



总顾问 费孝通 总主编 季羨林 副总主编 柳斌
中华万有文库



中小學生天文知識

不可思议的天体

——黑洞

ZHONG XIAO XUE SHENG TIAN WEN ZHI SHI

北京科学技术出版社
中国社会科学出版社

中华万有文库

总 顾 问 费孝通
总 主 编 季羨林
副总主编 柳 斌

科普卷·中小学生天文知识

不可思议的天体

——黑洞

《中小学生天文知识》编委会

主 编	王波波	曹振国			
副主编	魏富忠	胡向阳	向 英		
编 委	王波波	曹振国	魏富忠	胡向阳	
	赵文博	谭业武	齐小平	齐旭强	
	岑 锋	张 敏	葛智刚	项 华	
	王辅忠	吴先映	向 英		

北京科学技术出版社

中国 社会 出 版 社

中 华 万 有 文 库

图书在版编目 (CIP) 数据

中小學生天文知識/季羨林總主編.-北京:北京科學技術出版社,1997.10(中華萬有文庫·科普卷)

ISBN 7-5304-1873-4

I. 中... II. 季... III. 天文学-基本知识-
青少年读物 IV. P1-49

中國版本圖書館 CIP 數據核字(97)第 23749 號

科普卷·中小學生天文知識

不可思議的天體

主編 王波波 曹振國

北京科學技術出版社出版
中國社會出版社

北京牛山世興印刷廠印刷 新華書店經銷

787×1092 1/32 5.5 印張 102 千字
1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷
印數: 1-10000 冊

ISBN 7-5304-1873-4/Z·922

定價: 120.00 元(全套 20 冊)單冊定價: 6.00 元

中华万有文库

总 顾 问 费孝通

总 主 编 季美林

副总主编 柳 斌

《中华万有文库》编辑委员会

主 任： 刘国林

秘书长： 魏庆余 和 龚

委 员： （按姓氏笔画为序）

王 斌	王寿彭	王晓东	白建新
任德山	刘国林	刘福源	刘振华
杨学军	李桂福	吴修书	宋士忠
张 丽	张进发	张其友	张荣华
张彦民	张晓秦	张敬德	罗林平
封兆才	和 龚	金瑞英	郑春江
单 瑛	侯 玲	胡建华	袁 钟
贾 斌	章宏伟	常汝吉	彭松建
韩永言	葛 君	鞠建泰	魏庆余

《中华万有文库》

总序言

本世纪初叶，商务印书馆王云五先生得到胡适之、蔡元培、吴稚晖、杨杏佛、张菊生等 30 余位知名学者、社会贤达鼎力相助，编纂出版了《万有文库》丛书。是书行世，对于开拓知识视野，营造读书风气，影响甚巨，声名斐然，遗响至今不绝。

1 千多年以前，南朝学者钟嵘在《诗品》中以“照烛三才，晖丽万有”来指说天地人间的广博万物。今天，我们全国各地的数十家出版发行单位与数千名作者以高度的历史责任感，联袂推出《中华万有文库》，并向社会各界读者，特别是青少年读者做出承诺：传播万物百科知识，营造益智成功文库。

我们之所以沿用《万有文库》旧名，并非意图掠美。首先，表明一个信念：承继中国出版界重视文化积累、造福社会、传播知识的优秀传统，为前贤旧事翻演新曲，把旧时代里已经非常出色的事情在新时代里再做出个锦上添花。其次，表明我们这套丛书体系与内容的鲜明特点。经过反复论证，我们决定针对中小学生正在提倡素质教育的需要和农村、厂矿、部队基层青年在提高基本技能的同时还要提高文化与科学修养的广泛需要，以当代社会科学和自然科学的基础知识为基本立足点，编纂一套相当于基层小型图书馆应该具备的图书品种数量与知识含量的百科知识丛书。万有的本意是万物，百科知识是人类从自然界万物与社会万象之中得到的最重要的收获，而为表示新旧区别，丛书之名冠以中华。这就是我们这套丛书的缘

起与名称的由来。

《中华万有文库》基本按照学科划分卷次，各卷之下按照内容分为若干辑，每一辑大体相当于学科的2级分支，各卷辑次不等；各辑子目以类相从，每辑10至100种不等，每种约10数万字，全书总计300余辑3000余种。《中华万有文库》不仅有传统学科的基本知识，而且注意吸收与介绍相关交叉学科、新兴学科知识；不仅强调学科知识的基础性与系统性，而且注重针对读者的年龄特点、知识结构与阅读兴趣而保持通俗性和趣味性；不仅着眼于帮助读者提高文化素质与科学修养，而且还注重帮助读者提高劳动技能和社会生存能力。

每个时代中的最大图书读者群是10至20岁左右的青少年。每个时代深远影响的图书，是那些满足社会需要，具有时代特点，在最大读者群中启蒙混沌、传播知识、陶冶情操、树立信念的优秀图书。我们相信，只要我们扎扎实实地做下去，经过几个以至更多的暑寒更迭，将会有数以百万计的青少年读者通过《中华万有文库》获取知识，开阔眼界，《中华万有文库》将在他们成长的道路上留下明显的痕迹，伴随他们一同走向未来，抵达成功的彼岸。

海阔凭鱼跃，天空任鸟飞，凭借知识力量，竞取成功，争得自由。在现代社会中，没有人拒绝为获取知识而读书，这是《中华万有文库》编纂者送给每位读者的忠告。追求完美固然是我们的愿望，但世间只有相对完善，《中华万有文库》卷帙庞大，子目繁多，难免萧兰并擷，珉玉杂陈。这些不如人意之处，尚盼大家幸以教之。我们虚心以待。是为序。

《中华万有文库》编委会

目 录

黑洞概念的发展史	(1)
被人遗忘的拉普拉斯黑洞	(1)
黑洞的概念	(1)
爱因斯坦相对论与现代黑洞观念	(3)
什么是黑洞	(5)
从牛顿绝对时空到相对论时空	(5)
史瓦西黑洞	(10)
黑洞的边界	(11)
黑洞的形成	(15)
恒星坍缩成中子星	(15)
中子星继续坍缩成黑洞	(16)
黑洞的结构	(20)
“消失”在宇宙空间的恒星	(20)
事件视界——“黑洞的世界”	(22)
奇点——无穷大的时空弯曲	(24)
空空的黑洞	(24)
黑洞附近的时间问题	(26)
带电黑洞的结构	(27)
带电且旋转的黑洞	(31)
到黑洞去旅行	(34)

从远处看黑洞	(34)
黑洞附近的起潮力	(38)
向视界靠近	(41)
黑洞的别名冻结星	(47)
视界面是一个极限面	(48)
通过视界	(50)
黑洞的内部	(52)
黑洞在哪里	(55)
分光双星	(57)
多普勒位移	(60)
御夫座星的研究史	(65)
X 射线源和黑洞	(68)
X 射线天文学	(70)
闪烁 X 射线源	(71)
天鹅座 X-1——第一个黑洞的发现	(73)
天鹅座 X-1 的非黑洞解释	(80)
天鹅座 X-1 是黑洞更可信	(83)
其他的黑洞候选者	(84)
特小黑洞与特大黑洞	(87)
爆炸中的特小黑洞	(87)
黑洞的蒸发	(91)
特小黑洞在那里	(93)
超大质量黑洞	(96)
黑洞和宇宙学	(99)

终极黑洞·····	(101)
原生黑洞·····	(113)
黑洞对人类可能的影响·····	(123)
黑洞对星际航行的威胁·····	(123)
黑洞使时间变慢·····	(124)
向黑洞索取免费的能源·····	(125)
黑洞炸弹·····	(126)
黑洞与引力波·····	(128)
引力波的产生·····	(128)
可能发现了引力波——双脉冲星·····	(131)
搜寻引力波的意义·····	(134)
相对论基本原理与黑洞的新观念·····	(137)
牛顿的绝对时空观·····	(137)
神秘的以太·····	(142)
爱因斯坦的卓越贡献·····	(144)
广义相对论基本原理·····	(150)
弯曲的时空与广义相对论的三大验证·····	(155)
黑洞与广义相对论的进一步验证·····	(161)
没有黑洞的相对论新观念·····	(164)
没有黑洞的宇宙学新观念·····	(164)

黑洞概念的发展史

被人遗忘的拉普拉斯黑洞

1796年，拉普拉斯首先提出黑洞的想法。他最初的这种冥想是建立在牛顿引力理论和现在已被否定了的牛顿关于光的微粒理论的基础上。牛顿认为光是一种很小的粒子式微粒，其性质类似于非常小的弹子球。拉普拉斯认识到这种微粒不可能从一个质量充分大的天体表面上逃逸出来。他把这种质量极大的天体称为“暗黑天体”，他很想知道宇宙太空中是否充满着这种天体。也许它们像恒星那样多吧？但是，没有任何办法来验证他的想法，于是这种观念便隐没于书库之中，不再为人引证和研究。

黑洞的概念

在这里还要稍微提一下，黑洞的整个概念是一个伟大的法国数学家拉普拉斯早在1789年就预见到了。它把光当作一束小微粒流，用牛顿的引力理论计算出这个结果：如果一个天体的密度或质量大到一定程度，它就看不见了，因

为光都不能快到足以逃离其表面。严格地说，拉普拉斯的概念不同于爱因斯坦从“相对论”中得出的理论，但带来了同样的结果。而且，甚至在牛顿的理论中也能找到有类似黑洞存在的可能性，这是十分有趣的。要说洞是空间的一个区域，里面的逃逸速度大于光速，也不是完全不对的。这是对黑洞的粗略的观察，但或许能使黑洞这个概念变得更容易理解。

有了这些概念后，现在让我们强调一下黑洞本身不是一个固体，它是空间的一个区域，物质能落进去，而出不来。但这些物质并非完全充满了整个洞的内部。事实上它们根本不会有任何体积。物质的引力场首先使黑洞形成，但当物质一旦处在视界之内时，对黑洞的大小就丝毫不发生影响。黑洞的大小取决于视界内的物质总量，而不是它占有的体积。在这里我们又一次碰到了难以令人相信的然而必须接受的情景。

显然接下来要问：“如果你不断地向黑洞中注入物质，那么，黑洞中最终不是要装满了直到物质的表面超过史瓦西半径为止？”这个问题看来好像很合乎逻辑，但在研究黑洞时，日常经验是不能用来作指南的。让我们重复一遍，黑洞的大小取决于内部物质的总量。如果我们不断地向黑洞里面扔进物质，黑洞就变大，它的胃口，就如同所得税收集器那样贪得无厌。吞下越多，就变得越大，照理论上来说我们要不断地“喂”它，一直到把整个宇宙中的物质都消化了，可是它的本性还是没有改变，它仍然是个黑洞，虽

然确实成了一个大黑洞。

爱因斯坦相对论与现代黑洞观念

一个点状体周围的区域会是什么样的空间呢？在爱因斯坦引力理论问世后不久，德国物理学家史瓦西对此进行了研究。就这样，他发现了这种标准黑洞可以作为模型世界中的一员，但是，同以前的拉普拉斯一样，他也不知道这样一种天体实际上能否存在。这个问题直到 1939 年才得以确定，当时奥本海默和一位学生斯奈德尔共同证明了一颗冷却的、质量非常大的恒星必然要无限坍缩而变成一个黑洞。他们这个研究工作与奥本海默-沃尔柯夫关于中子星的论文差不多是同时的，而且得到大致相同的结论：黑洞可能存在。就是说，黑洞可能是真实的天体，而不只是人们利用爱因斯坦理论而作的一种数学游戏。60 年代，人们对爱因斯坦广义相对论的兴趣又复活了，黑洞问题得到了细致的研究，并且阐明了它们的详细性质。

这段历史有些类似于中子星研究的早期历史。这两类恒星残骸首先都被作为理论上的天体而了解的。有关它们的研究工作在 60 年代以前都开展得非常少。在 60 年代，由于天文观测手段的进展，对于它们的兴趣再度兴起，使得它们得到更加深入的研究。遗憾的是，发现黑洞比发现脉冲星要更为困难，下面很快就会明白这一点。

黑洞和爱因斯坦引力理论是非常紧密地联系在一起

的。人们不能利用牛顿引力理论来描述黑洞，即使是非常粗略的描述也不行。这是因为只有在引力很微弱以及速度很低的情形下，牛顿理论才适用。人们要认识一个被抛在空中的棒球的运动轨迹时，牛顿理论是可以应用的。但是，在黑洞表面附近，广义相对论的效应占有主导地位。

倘若黑洞真的是同爱因斯坦理论紧密相关，人们自然有理由可以提出疑问：爱因斯坦理论如果是错误的，那么情形又是如何？爱因斯坦理论无疑是正确的引力理论，它几乎为所有从事研究工作的物理学家所接受。而且爱因斯坦理论的大多数竞争者实际上只是修改这个理论，他们对于引力的描述只是在细节上不同于爱因斯坦的广义相对论，观念上却没有什么实质性的区别。实验几乎排除了所有替代的引力理论。那些对爱因斯坦理论的基本框架添加一点附加效应的其他理论充其量对论题只是引起微小的变化，它们产生的黑洞，实质上同这里描述的黑洞是相同的。有一种几乎已被观测否定的理论：罗森的“双度规”引力理论。它和爱因斯坦理论很不相同，它不产生黑洞。

什么是黑洞

从牛顿绝对时空到相对论时空

要说对黑洞的概念不熟悉是非常合乎情理的。我们必须对完全超出普通经验的某些东西作一个具体的描写，使人接受这样一种局面：不仅全然不符合早被接受的自然规律，而且与一般常识也格格不入。的确，这种图像是爱因斯坦“广义相对论”合理的推论。但对一般人来说这样做也没有多大益处，因为“相对论”这词本身也是超出日常经验的。

我们希望在深究数学的基础上，尽可能明白地向大家介绍关于黑洞的概念。我们非常清楚地知道这样做可能过分简单化，但是如果我们对一幅不会使人产生误解的图画作出一番描述，那也足够了。首先我们必须记住对所碰到的各类事情决不能死板地接受。例如，把一个原子描写成一个带有正电荷的原子核和一组带有负电荷的电子所组成的小太阳系是十分恰当的。这意味着各种微粒在显微镜下更像一颗小弹丸。现代理论强调不能把原子看作是由微小的固态物质团块构成，但是如果我们不是太按字面意义

来理解它，这种图像不会使人产生误解。

那么，让我们先从介绍爱因斯坦的“相对论”开始。从这个角度来说比可能想象的要令人惊奇得多！先从容易理解的引力概念开始，依萨克·牛顿先生于1687年导出的关于引力的著名定律，被认为是人类第一个最伟大的智慧的成果。牛顿视引力为两物体之间的相互作用力，地球吸引着月亮，月亮吸引着地球等等。随着两物体之间距离的增大，引力遵照一个非常明显的数学关系变得越来越弱。即如果你使距离增大1倍，引力就缩小到原来的 $1/4$ 。当这个定理得到证明后，人们发现它的效用一直很好，而且对大部分用途都十分合用。例如，在计算飞往火星的空间控制器的轨道时，也离不开牛顿万有引力定律。

假定存在着“绝对时间”和“绝对空间”，那么，在宇宙中时间会到处都以同样的速度前进，不管你处在哪个位置上或以怎样的方式运动。关于“绝对空间”有一个实际试验。我们已知道了地球绕太阳运转的速度（每小时107000千米），但我们在空间的运动速度有多大呢？近在19世纪人们还以为整个空间必定充满着一种叫“以太”的奇妙媒介物，光被视作为一种波动，而波在一些物质中运动（例如声波在空气中运动）。这样，如果不考虑太阳而能够测得地球在以太中的运动速度，那么我们就具备了可以引导我们的一些真正基本的东西。

人们进行了各种各样的试验。最著名的是1887年的迈克尔逊-莫利试验。其基本想法是光在以太中以不变的速度

前进，而地球本身也在以太中运动着，于是好像以太也从我们旁边流过一样。顺地球运动方向射出的一束光逆以太运动方向而行，它穿过指定距离的时间要比这束光以某种角度穿过以太所需的时间来得长。两种速度之差就是地球在以太中活动的真正速度。迈克尔逊和莫利用非常灵敏的仪器进行试验，结果都是绝对地否定的。光似乎总是以不变的速度前进，不管光源的速度如何，也不管观察者是否在运动。

如果真是这样的话，似乎不合常理，当然与日常经验也作过比较。如果你以每小时 5 千米的速度在一列以时速 100 千米通过车站的火车上行走，停在站台上的任何人都有理由认为你的速度是每小时 105 千米。事情就是这样，你所做的就是把火车的速度（每小时 100 千米）和你自己的速度（每小时 5 千米）相加，不是牛顿也能得出 $100+5=105$ 这个结论。光以每秒 30 万千米的速度前进，而迈克尔逊-莫利结果似乎含有这种意思： $30\text{万}+30\text{万}=30\text{万}$ 。真是难以理解。

他们企图简单地说实验是错的，而且在仪器和解释方面也有不少错误。不幸，进一步研究发现仪器没有问题，实验结果还是被人接受了，虽然要对它作出解释则是另外一回事。常识也被搁在一边，爱因斯坦的“相对论”也就在这里用上了。虽然在几年之内没有得到公认，而在那一段时间内，迈克尔逊-莫利实验使科学家们迷惑不解。

爱因斯坦“狭义相对论”发表于 1905 年。广义地说，

它不存在绝对的参考标准，每种事物都依赖于观察者观测的情况；而且所有解释都是同样正确的。你不能简单地拿太阳、地球、尤斯顿站这类特殊物体来解释，说“这是静止的，所有的运动都与它有关”。各个事物之间都是相对的。我们也不是单就空间和运动而言，时间也是这样。在 1 艘以接近光速的速度飞离地球的宇宙飞船上的人，与停在地球上的人相比，时间就好像变慢了。速度增加到与光速相等（每秒 30 万千米），那么时间相对来说就停止了。对物体的大小也有特殊的影响，以这么快的速度前进的物体，长度必然缩短，而到达每秒 30 万千米时，它就缩小到什么也没有了。这被人称为洛伦兹-菲茨杰拉德收缩，这是两位首先预言这个现象的物理学家名字，虽然公认是由于错误的推理。

对运动物体的质量还有更大的影响——一个物体运动得越快，它的质量与它静止时相比就变得越大。在这种情况下，运动速度越接近光速，物体的质量就越大，若可能达到光速，物体的质量就变得无限大——换句话说，我们永远也不可能达到光速！

科学家们有很长一段时间都持怀疑态度。但是暂时与我们无关的一些实际试验证明：这些奇怪的效应确实会发生。让我们补充一下，在非常大的速度下，这种效应也不是十分引人注目的。如果你以每小时 150 千米的速度驾车前进，绝不会有缩短或失去“时间”的危险性。一般飞向月球的宇宙飞船，其长度的缩小只是几毫米的微小变化，但

确有其事。

爱因斯坦根据这些概念发展了他的“相对论”，这实质上是一种关于引力的理论——一种对牛顿引力理论的改进。人们常说爱因斯坦认为牛顿理论是错误的，这是不对的。爱因斯坦只是推广了牛顿引力定律，并把它们用于在牛顿引力定律问世之时，还不能精确测量到的一些量上。

在谈到黑洞之前，我们还必须注意几点：第一，根据“相对论”，时间与空间之间存在着十分密切的不能真正分开的联系。以时空作为参考系这句话，可能听起来没有意义，然而并非如此，它显示出其间的密切联系。第二，物质的存在引起时空的弯曲，这以几种方式显示出来。例如，从遥远恒星发出的一束光通过太阳表面附近时将发生弯曲，它只偏转了一点点，但可测出来。在“相对论”中，时空弯曲证明了引力的存在，曲率越大，引力也越大。第三，从一个发光天体的光谱中可察觉出另一种效应。我们已经讨论了多普勒效应，它能使一个远离的天体发出的光谱线向红色或长波端偏移。爱因斯坦预言，光波在引力场内运动所必须做的功也产生红移。这种情况可以直截了当地说，光波逃离一个高密度大质量天体要做功；这就使波长增加——出现引力红移，必须把它与多普勒效应引起的任何红移区分开来。引力红移对一个高密度的小天体是最显著的，在白矮星的光谱里可以观测到它。天文学家对此进行了探讨，发现了爱因斯坦所预言的事实。

总之，“相对论”经得起迄今所设计的任何试验，它可

能使常识混乱，但这也没办法。当我们考虑像陌生的黑洞那样的事情时，就宁愿以“相对论”为理论基础，而不是以日常经验为根据了。当然，还有许多问题需要进一步弄清楚，甚至到了今天也不是所有的权威都对“相对论”十分精通。但最根本的一点是：它是不能轻易否定的。

史瓦西黑洞

1916年，史瓦西研究了一个球形天体，它的体积极小而且质量极大。他说，它将时空弯曲得这样严重，以致任何东西甚至光都不能逃离它。拿太阳来作例子，它的半径约70万千米，任何人都能看到它发出强烈的光。压缩太阳而不减小它的质量，光就越来越难以射出。当太阳的半径缩小到一定数值，光就完全射不出来了。这个半径称为史瓦西半径。围绕具有这个半径的质量的边界叫视界。因为在这个边界外的任何人也不可能知道里面是什么。视界是从内向外交流的绝对障碍，它标志着物质进去后就消失的黑洞边界。它的确是黑洞的第一个最基本的概念，虽然许多年来它一直只是一个理论上的概念。

黑洞这个词对这类天体是十分适合的。光或物质能掉进里面去，然而没有任何东西再能逃出来。对外部观察者来说物质永远毁灭性地消失了。

接着，让我们来算一下具有和太阳质量相等的天体的史瓦西半径大小。答案是3千米。那么地球又如何呢？如

果我们想把这个世界变成黑洞，我们必须将它压缩成半径不到 1 厘米的体积。换句话说，整个地球能放进一颗普通大小的玻璃弹子中去！物质的密度大得难以想象，但是，我们在下面就会知道，从种种理由可以断定，一些恒星能够以任何速率靠坍缩结束自己的一生，而使其密度大到一个黑洞所需要的那种程度。

黑洞的边界

在继续探索黑洞形成的种种方式之前，让我们再来讨论一下视界。记住它是黑洞的边界。边界之外的光不能向外射出，而在边界外面，光就能向外发射或返回黑洞。离视界越远的发射源所发射的光，越不易被黑洞吸收进去。

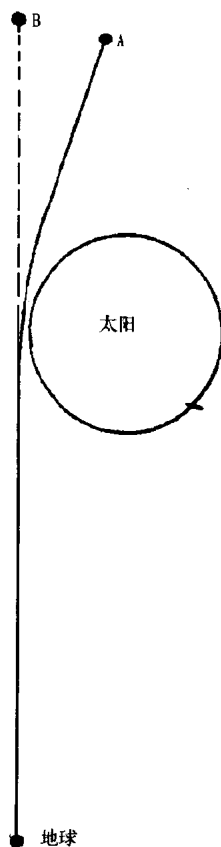


图 1 光的弯曲

恒星的真正位置在 A 点，但由于它经过太阳附近时光发生弯曲，从地球上看上去它好像处在 B 的位置上

想在日常生活中找到一个类似的例子是困难的，但是，下面的事例可能对我们有点帮助，虽然它还是不能使人理解得十分深刻。试想你站在河边（最好选一条平静的河），流速从上游非常平静的地方向下游的瀑布边缘逐步增大。手中拿一把石子向上游平静的河水中扔去，你会看到涟漪均匀地向上游和下游扩展开去。现在向瀑布那里走去，每隔一定距离朝河水中扔一些石子，你会看到离瀑布越近，水中的涟漪向上游扩展的越少，直到最终到达这样的地方：所有的涟漪都向下游边缘扩展开去。事实上你越过了河的“视界”。在它外面（从瀑布那一端来说）涟漪都不能到达上游。在视界本身内部，涟漪在水中的速度与水流的速度相等，因此，在您看来，涟漪将是静止的。

在黑洞的视界上，发射的光将是静止的，再也不会向外发射到宇宙中，也永远不会返回到黑洞中心。任何物体，例如空间飞船都比这来得更糟，因为它的速度不能像光那样快，更不用说比光还快。结果，在视界外的一定距离中，它比光更容易被黑洞吸收进去。进一步想想这个类似的例子，把涟漪的速度看作河水中所有物质中最快的。很明显，甚至在到达河的视界之前，任何物体——如一只船都逃不出被瀑布卷走的命运。

现在试想一个站在木筏上的观测者，随波逐流。就他本人来说与周围的流水比较是相对静止的。但当他来到我们这些站在河岸上的人所知道的视界时，他就会看到我们犹如一个平静的涟漪从他旁边经过，我们的速度，相当于

我们看到平静的上游中的涟漪的速度。对木筏上的人来说，视界上的涟漪是非常普通的，以和其它任何地方相同的速度流动着，但对河岸上的人来说，这些涟漪是静止的，而木筏全然不顾危险冲过它。在两种不同的参照系统（木筏和河岸）里的两个观察者在描写所发生的情况时，都是正确的。木筏上的观察者在通过视界时并没有发现什么不同寻常的事，但是他却再也不能用涟漪与上游的任何人取得联系，他的最终命运是可想而知的。

这个类比对这样两个不同意见颇有启发：一个是远离黑洞的遥远的观测者所持的意见，另一个是正朝黑洞中心去的观察者的意见。当后者掉进去后，他在穿过视界时并没有发现异乎寻常的事。如果在黑洞边界上测一下光速，他也以为如同往常一样，而无视这样一种事实：外面的人看起来光是静止的。就“掉进去”的观察者来说，他将在有限的时间（通常非常快，取决于黑洞的大小）内来到黑洞中心。事实上他到达黑洞中心以前早就被巨大的引力潮汐力摧毁了，正如我们将在下面看到的那样。然而这也不影响其中包含的那个总则——即掉进黑洞的任何物质都会在有限的时间内到达其中心。

但是，外部观察者的意见则全然不同了。根据相对论原理，对于一个快速前进的物体来说，时间好像放慢了。相对论同样也预言，时间对一个位于强引力场之内的观察者来说，也放慢了。那么，对外部观察者来说，掉进引力场之内的观测者越接近视界，时间就显得越慢，直到到达视

界，时间就完全停止了。假如掉进去的观察者以十分明亮的火炬引路，使外部观察者能看到他前进，那么，外部观察者将看到掉进去的观察者越来越接近视界，但永远不可能穿过它。因为就外部观察者而言，掉进去的观察者的时间越来越慢，直到停止，当他一到达黑洞的边界，外部观察者就能永远继续看到掉进去的观察者发出光，而后的形象将在视界上十分明显地永远冻结了。

实际上，外部观察者不能以这种方式得到视界的光，因为存在着引力位移现象。光源（即掉进里面的观测者）越接近视界，这种红移就越强，而到达外面的光就越弱。到达视界后，红移就变得无限大了，外面就再也收不到光线。换句话说，不断增强的红移，使掉进里面的观察者在到达黑洞边缘之前，早就迅速消失得无影无踪了。

不过，其中包含的原则却是不可否认的。就掉进去的观测者来说，他会宣称他在有限的时间内到达了黑洞中心；外部观察者却说要穿过视界，需要无限长的时间。哪个对？答案是“都对”。要记住，根据相对论，无论时间或空间都没有绝对参考标准。两个观测者都对，只是不要忘了各自的参照系。

现在你可以理解我们早些时候所说的日常经验不能用来指导我们所遇到的这些非常情况了。这些经验在日常生活中是很可信的，但把它们用于相对论主宰的情况中，尤其是黑洞，就无效了。

黑洞的形成

恒星坍缩成中子星

通常的物体只有当其中的吸引因素与排斥因素势均力敌之时，它才能处于稳定或准稳定状态。恒星也是如此。不过，恒星的质量巨大，在其吸引因素中，粒子间的电磁作用已相对下降，万有引力变成主要的了。这种引力不但支配着恒星的运动，而且是影响恒星结构和演化的一个基本因素。恒星中的排外因素，主要由热运动、辐射压力、转动引起的离心力以及其它非热压力产生。恒星从诞生、发展到消亡的整个过程，都是由吸引与排斥的对立、斗争和转化所推动的。

通常的恒星各部分间的引力（自引力）虽然很强，但由于热核聚变反应所产生的排斥力可以与之抗衡，所以它能够处于一种平衡状态。但是当恒星中所有核燃料全部耗尽以后，排斥力大大降低，引力占优势，恒星就要收缩。恒星收缩时，物质中的电子被紧紧地挤在一起。由于泡利不相容原理的要求，任何两个电子都不能处于完全相同的状态中。这样一来，当恒星收缩到一定程度以后，被挤在一

起的电子将产生一种排斥力（简并电子压力）来抵挡自引力的影响。对于质量不太大的恒星，这种抵挡是十分有效的，它可以使恒星稳定在一种新的平衡态——白矮星状态。如果电子的这种排斥力，仍不能抵御恒星向内收缩，那么，在它的密度达到核密度附近时，还可以由中子产生的排斥力（简并中子压力）来与自引力抗衡，这时恒星就将变成一颗中子星。

中子星继续坍缩成黑洞

人们发现，用广义相对论的结构方程来讨论中子星的平衡问题，不论中子星的物质满足什么样的物态方程，都存在一个质量上限，称为奥本海默极限。中子星的质量只有小于这个极限时，才能稳定平衡。奥本海默极限的具体数值与所用的物态方程有关，由于目前我们对核密度及超核密度下物质的物态了解甚少，因此要准确地给定这个数值的大小是困难的。不过人们从物态方程应该满足的普遍条件出发，已经证明，稳定中子星的质量是不能超过 3.2 个太阳质量的。如果超过这个数值，中子简并压力就无法与自引力抗衡了。这时，恒星将很快通过中子星阶段继续收缩下去。而且随着体积的减小，自引力的作用会越来越强，收缩的速度也会越来越快。虽然收缩过程中，恒星核心的温度有时会达到几十亿度的高温，但是这种热效应并不能造成任何有效的排斥作用来减低收缩的速度。因为这时各

种产生中微子的反应也都迅速发生，这些过程要消耗大量热能。而且，中微子穿透能力特别强，它们在很短的时间里就会带走大量的能量，使收缩遇到的阻力愈来愈小。由于恒星通过中子星以后，就没有什么力量能够抵挡引力的作用了，收缩将不可抗拒地进行下去，它一泻千里异常迅捷，造成恒星核心很快向中心坍陷。这种不可抗拒的收缩就称之为完全引力坍缩。

遭遇完全引力坍缩的恒星，其表面引力场将不断增强。任何物体要想从恒星表面逃离出去，所需要的逃逸速度也将越来越大。地球上的逃逸速度是每秒 11.2 千米，这就是通常所说的第二宇宙速度。但是，当恒星坍缩到它的引力半径时，逃逸速度就增至每秒 30 万千米，这已经是光的速度了。一个物体的引力半径是与它的质量成正比的，3 个太阳质量的恒星，引力半径为 9 千米；10 个太阳质量的恒星，引力半径就是 30 千米。由于任何粒子的速度都不能超过光速，所以恒星的半径坍缩到引力半径那么大的时候，它所发射的任何粒子都要被它强大的引力场拉回去。光子也不能发射到远处，所以我们看不见它，结果便形成了一个黑洞。当然，从原则上讲，恒星在坍缩成黑洞前的形象是永远也不会消失的。因为当恒星的半径趋近于引力半径时，它表面发射的光逃逸出来所需的时间也越来越长。在引力半径处，由于光子徘徊不前，这个时间要变成无限大。不过实际上，在恒星变成黑洞以后的很短时间里，远处观测者就不能接收到它原来发出的辐射了。因为它在到达引力半

径以前所发射的光的数量是有限的，这有限数量的光将为观测者在无限的时间间隔内所接收。因此，观测者不但看见光的红移增加，光的强度也要很快按指数衰减。

黑洞内的情形，观测者无法看见。恒星形成黑洞后的命运问题，目前还是一个复杂的理论问题。不过通常认为坍缩成黑洞的恒星，在通过引力半径以后，将不可避免的被挤压成超高密态，并很快落到黑洞的中心点上，形成一个时空奇异点。在黑洞内，潮汐性拉力异常明显。落进黑洞的物质，在几毫秒内就要被撕得粉碎，而失去它原来的特性。当然，黑洞内如果有某种排斥效应出现，这种结局也可能避免。不过排斥效应源何而来，至今还很难说。

普通恒星要变成黑洞，它的半径就必须缩小几百万倍，而且最后要突破简并中子压力的阻挡，只有通过完全引力坍缩才有可能。因此，中子星具有稳定平衡的最大质量这一点，是黑洞有可能存在的关键。近几年来，有人不用广义相对论的结构方程，用其它引力理论所做的计算也表明，稳定中子星应该具有最大的质量上限。比如，由布朗斯-狄克方程所得到的质量上限的数值约为 3.4 个太阳质量，与广义相对论的结果没有多大差别。从其它一些引力理论也可以得到黑洞概念。所以归根结底，它还是恒星内吸引和排斥斗争的一个结果。

除了晚期恒星的引力坍缩会形成黑洞以外，更大质量的天体也可能经过坍缩而变成黑洞。最近若干年来，由于类星体、星系的核爆发及引力波等一系列剧烈释能过程的

发现，也促使很多人认为星团、类星体及星系核中有可能存在1万个太阳质量到几亿个太阳质量的巨型黑洞。这些黑洞甚至可以大量地吞食其周围的恒星。

如果天体是由超密态物质演化而来，非引力坍缩形成的小黑洞也可能存在。因为在这些又热又密的介质中的高度受压区域内，密度的局部涨落，可能使其中一部分物质的体积小于其引力半径规定的范围。例如10亿吨的质量，如果使它集中到相当于质子大小的空间内，它就成为一个小黑洞了。这种小黑洞可能游荡在我们太阳系或银河系中。最小的黑洞，其质量可能只有十万分之一克，半径将非常小。不过在这样小的距离里，空间本身就可能不连续，而且会有很快无规涨落存在，因此，这种最小的黑洞一旦生成，也立即会被无规涨落破坏掉。

黑洞的结构

“消失”在宇宙空间的恒星

设想有颗生命即将结束的大质量恒星，热核燃料的全部内部能源均已耗尽，一次超新星爆发则使星体碎裂。虽然这颗星的大部分气体已骤然倾泻出去，残留的燃余星核仍包含有比 2.5 个太阳质量还多的物质。自然界不存在任何一种力能支撑得住这个恒星遗骸，它注定要变成一个黑洞。

在引力坍缩开始之前，燃余恒星周围的引力一直是比较微弱的。当然，人如果站在这颗恒星上的话体重会达好几吨，但是面对不久即将发生的事，这点情况是无关紧要的。用广义相对论的术语来说，这颗就要毁灭的恒星周围的时空一直只不过是稍稍弯曲的。从这颗星射出来的光线也只不过稍微偏离其通常的直线路径，即产生轻微的偏折。

在燃余恒星内，引力一旦开始超过粒子间的力，坍缩就急速地进行。几秒钟后，由于这些粒子——电子、质子和中子实际上已相互挤进对方里面，于是恒星的大小急剧地收缩。随着引力将恒星物质压缩到越来越小的体积里，恒

星周围时空的曲率变得越来越显著。由于曲率不断增大,从恒星表面射出来的光线偏折角度就越来越大。如图 2 所示,事实上,平常逃逸到太空中去的那些光线,此时却拉回到恒星表面。

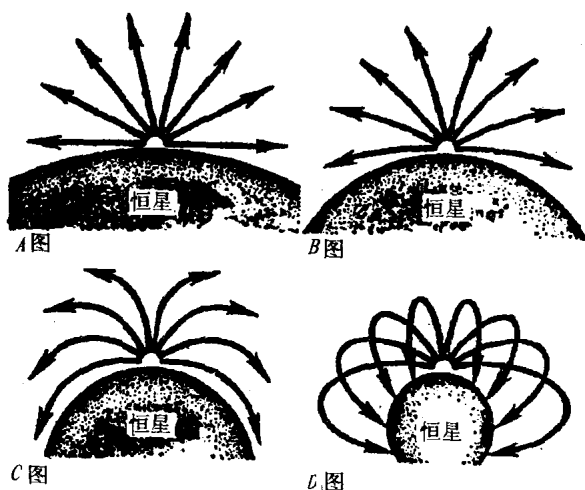


图 2 从坍缩恒星射出的光线

随着大质量垂死恒星的坍缩,恒星上的引力强度变得越来越强。这就是说,随着坍缩的进行,从恒星表面射出的光线被偏折的角度越来越大。A 图表示恒星正处在坍缩开始之前的瞬间;恒星周围的时空只有轻微的弯曲,这时从恒星射出的光线几乎沿直线行进。B 图和 C 图表示恒星正在坍缩之中,随着恒星周围时空曲率的增大,光线在行进中偏离它们通常的直线路径的程度也越来越大。最后,这种偏折变得极其严重,如 D 图所示,以致全部光线都被折回落到坍缩恒星的表面,到这个阶段,恒星已经退缩到它自己的事件视界以内去了。于是它就形成了一个黑洞。

在引力坍缩使恒星奔向其不可挽回的命运的同时，越来越多的光线弯曲回来落到收缩的恒星表面上。随着时空曲率的增大，只有在近于竖直方向上，从恒星射出来的那些光线仍然可以设法逃掉。由于越来越多的光线拉回到恒星，遥远处的天文学家们将看到这颗星很快地暗下来。

最后，坍缩达到某个临界阶段时，时空曲率变得非常大，以致使全部光线都折回到收缩的恒星表面。甚至就连沿竖直方向从恒星射出的光线也被拉了回来。因为从恒星发射出来的全部光线，无论发射方向如何，都被极度弯曲的时空偏折而返回，所以恒星就变成黑暗的了。同时，由于任何东西都不能行进得比光快，所以也就没有东西能从这颗星逃逸到外面的宇宙中，其引力已经变得极其强大，使得这颗恒星名副其实地从宇宙间消失了。

事件视界——“黑洞的世界”

在坍缩恒星收缩到任何东西——光也包括在内，都不能逃逸出来的阶段时，我们就说这颗恒星已经退缩到它自己的事件视界以内去了。举例来说，1 颗有 10 个太阳质量的物质的垂死恒星收缩成一个直径只有 60 千米的球体时，这颗恒星就消失在它的事件视界以内。它的消失是由于引力变得极其强大，以致从恒星发射出来的光线再也到不了呆在安全距离以外注视着这个恒星暴缩过程的人们的眼睛里。所以，我们说包含着 10 个太阳质量的物质的黑洞其直

径是 60 千米。

“事件视界”这个术语是十分贴切的。它在空间和时间的几何特性上是一个名副其实的视界，超过它，人们再看不到任何事件。人们没办法得知在事件视界以内发生了什么情况。人们和事件视界另一边的任何人都没办法通讯。那里是与我们的空间和时间割断联系的地方。那里不再是我

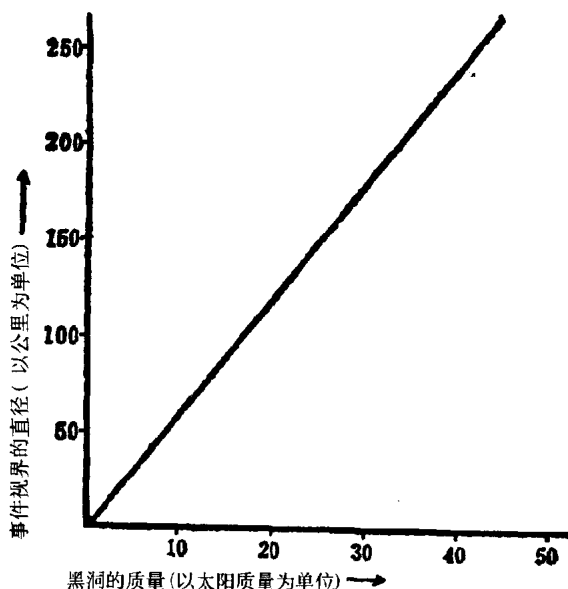


图 3 事件视界的直径

围绕静止黑洞的事件视界的直径与黑洞质量直接相关。质量越大，事件视界的直径也越大（这个图解只适用于不带电荷、不旋转的黑洞）

们宇宙的一部分。

事件视界的直径只同垂死恒星的质量成正比。例如，1个具有5个太阳质量的恒星尸骸，其事件视界的直径为30千米。一个具有20个太阳质量的黑洞，其事件视界的直径为120千米。图3中的图解，表明黑洞质量与事件视界直径之间的相应关系。

奇点——无穷大的时空弯曲

在远处的天文学家看来，垂死恒星一旦收缩到它的事件视界以内，就形成一个黑洞。但是，自然界仍然没有任何力量能支撑得住这颗恒星。所以，在持续增大的引力的严酷作用下，这颗星继续收缩。在这颗暴缩恒星周围，引力强度和时空曲率继续增长，直到整个恒星被挤压成一个单一的点为止！在这个点上，具有无穷大的压力，无穷高的密度，尤其重要的是具有无穷大的时空曲率。这里就是那颗恒星的归宿。恒星中的每颗原子和每颗粒子，在这样一个无穷大的时空曲率的地方，就被挤压得完全不存在了。这就是黑洞的实质，我们把它称为奇点。

空空的黑洞

我们很感兴趣地注意到，黑洞是非常简单的。如图4所示，我们的黑洞只由两个部分构成：1个奇点被1个事件视

界包围着。这就是黑洞的一切！

认识到黑洞是空的也很重要。那里绝对不存在任何东西！没有原子、没有岩石、没有气体、没有尘埃。什么也没有！虽然科学家们常把事件视界说成是“黑洞的表面”，其实在事件视界上并不存在什么物质的或有形的东西。全

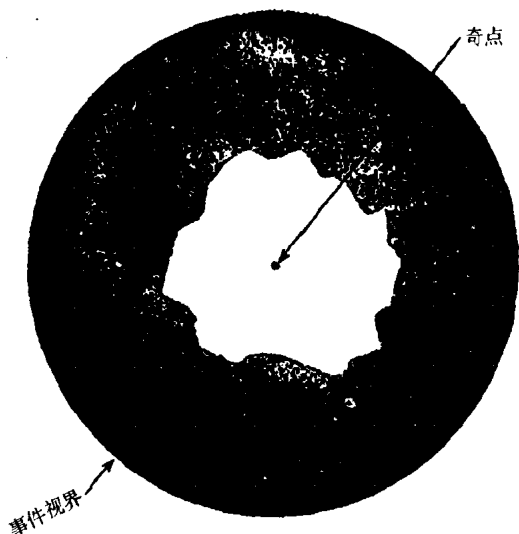


图 4 静止黑洞的结构

黑洞是由一个事件视界围绕着一个奇点构成的。在事件视界上，引力非常强烈，使得任何东西——甚至光也在内——都不能从黑洞逃逸出来。在事件视界以内，引力强度和时空曲率继续增大直到奇点。在奇点上，具有无限的时空曲率

部恒星物质已经被完全挤压进黑洞中心处的奇点中去了。黑洞完全是空的。唯一存在的就是一个高度弯曲的空间和时间的区域。

黑洞附近的时间问题

广义相对论的很多奇特效应——同样的效应在我们地球上或太阳附近是非常微弱的——在黑洞附近都增大到十分可信的程度。譬如说，我们知道引力能使时间变慢。这一现象在我们地球上是可以完全忽略的。但是，在围绕着黑洞的事件视界上时间将完全停滞。假如在你的朋友奔向一个黑洞的时候你注视着他，你会看到他的表走得越来越慢。在他正突破事件视界的瞬间，由于那里的时间是永远静止的，下落的表看起来就完全停顿了。当然，你那倒霉的朋友自己觉察不到这一切。他身体的全部功能——他的心脏跳动、他的新陈代谢和所有其它守时的过程，都受到跟他的手表完全相同的影响。你的朋友在这次到无限弯曲时空去的、决定命运的旅行中，亲自体验到是如何以接近光的速度穿过事件视界的。

在事件视界里边，我们发现那里空间和时间的方向变得相互交换了！要想知道这是什么意思，请先考虑一下在地球上你自己的生活。在空间的三个方向（上一下、左一右、前一后）的任一方向上，你都有运动的充分自由。但是，不管你愿意不愿意，在沿着时间流逝的方向上，总是

把你从摇篮时期拖向坟墓。在黑洞里，你的确有在时间上往返的自由，但这对你并没有好处。每当你在时间上取得自由的时候，你就在空间的一个方向上失去自由。你会发现，你正在沿着空间方向被不可挽回地直接拖进奇点去。

带电黑洞的结构

直到现在为止，我们只把注意力集中在可能是黑洞最简单的类型上，也就是：只包含物质的黑洞。具体地说，这种黑洞没有携带任何电荷，同时它也不旋转。这种不带电的静止黑洞是由一个单独的事件视界围绕着奇点构成的。由于描述这种黑洞的方程式是首先由德国天文学家卡尔·史瓦西在 1916 年写出来的，所以它有时被称为史瓦西黑洞。

黑洞显然必须包含物质。首先，如果没有伴随物质的引力，黑洞根本不可能形成。因此，黑洞的质量（就是进入奇点的物质总量）是黑洞的一个重要特性。的确如此，我们从图 3 得知，黑洞的质量决定黑洞事件视界的直径。

黑洞还能有其他特性或特征吗？

很重要的人们认识到，黑洞以贪婪的、永无满足的方式吞噬东西。物体一旦掉进黑洞就算永远从我们的宇宙移去了。因为这种物体不再是我们宇宙的一部分，所以它的许多特性便再也检测不到。因此，这些特性也就不可能影响到黑洞的结构。

或许，最好通过例证来说明这一重要论点。设想你制造了两个黑洞。一个黑洞是用 10 个太阳质量的花生酱做的，而另一个黑洞是用 10 个太阳质量的砖头做的。在引力坍缩之前，说出哪个是用什么做的并不困难。花生酱看起来、闻起来、尝起来和触摸起来，都跟砖头完全不同。但是，在引力坍缩之后，就不可能再说出这两个黑洞的区别。因为掉进去的物质与我们之间由事件视界隔开，我们没办法发现哪个黑洞是吞噬了砖头的，哪个黑洞是吞噬了花生酱的。总之，因为掉进黑洞里的物质的许多特性都被黑洞吞掉了，所以这些特性（例如：颜色、质地和化学组成）不能影响黑洞的结构。

虽然落入黑洞的物质的个别特性不能影响黑洞的结构，但我们能知道已经被黑洞吞进去的物质总量。我们能够通过环绕黑洞的轨道上放置卫星来测量黑洞的质量。经过对卫星轨道的仔细观测，我们就能计算黑洞里面的物质总量。所给出的答案，即得到的黑洞质量的数值，是黑洞结构所依据的 3 个数值之一。我们所以能测量黑洞质量的原因，只是因为引力是一种长程力。黑洞的引力能在极远的距离上被探测到。

电场力与引力相同的一点是，电场力也是长程力。因此，如果黑洞携带着电荷，它产生的电场也能在极远的距离上检测和测量。在环绕黑洞的轨道上运行的卫星，携带上适当的仪器设备，也能用于测量黑洞具有的电荷总量。由于黑洞的这个特性能被离黑洞很远的人们测量出来，所以

黑洞的电荷总量也必定会影响到它的结构。黑洞所具有的电荷总量是黑洞结构所依据的 3 个数值的第二个数值。

设想有一个通常的、不带电荷的静止黑洞，图 3 就画出这样一个黑洞。现在，我们假设，通过投入一些电子，开始供给黑洞电荷。当黑洞开始显现出带有电荷时，围绕着奇点便又形成第二个事件视界。由于黑洞有了两种特性（质量和电荷），因此，它有了两个事件视界。此时，围绕着奇点有两处时间呈现出停滞。因而带电黑洞将有如图 5 所示的结构。

随着越来越多的电荷加入黑洞，内事件视界变得越来越大，而外事件视界却不断收缩。黑洞上可能携带的电荷极大值，出现在两个事件视界最后合二为一的时刻，如果试图强行使黑洞接受更多电荷，两个事件视界都将消失，只留下一个裸奇点。这些特性是在 1916 年到 1918 年之间由德国的赖斯纳和丹麦的诺德斯特龙首先系统阐明的。因此，带电黑洞有时称为赖斯纳-诺德斯特龙黑洞。

虽然理论上可能存在带有电荷的黑洞，但实际上我们并不期望在太空发现它。其理由是，二者对比起来，电场比引力场强大得多。例如，设想有两个电子相距数厘米，则这两个粒子之间的电力作用将是它们相互间引力作用的 10000 亿亿亿亿倍。其结果是，如果黑洞带有电荷，它将被强大的电场围绕。如果这个黑洞原来带有正电荷，其电场将把周围区域中带负电荷的电子强有力地吸进黑洞。就这样，黑洞将很快变成电中性的。

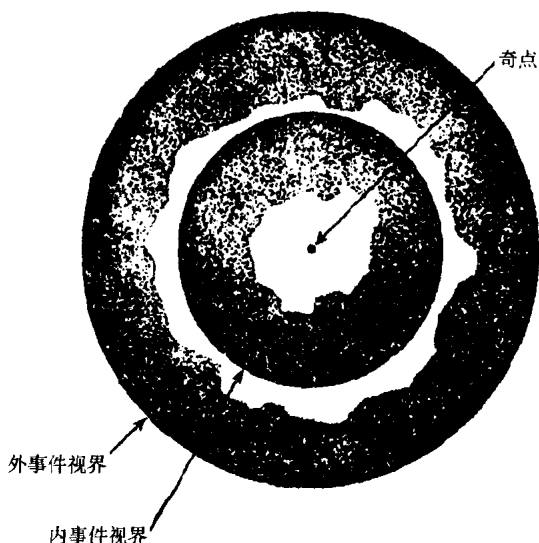


图 5 带电黑洞的结构

带电黑洞具有第二个(内)事件视界。在电荷不断增加时,随着外事件视界的收缩,内事件视界将增大。当内、外事件视界合一时,黑洞可能携带的电荷达极大值

我们并不期望在银河系周围能找到带电荷的黑洞,我们却的确期待着真正的黑洞是旋转的。事实上天空中所有恒星都在自转。它们的旋转速率一般都很低。但是,如果这样一颗恒星坍缩成黑洞时,它的旋转速度便急剧增加。因此,我们预测到旋转是由大质量死亡恒星尸骸所形成的黑洞的一个重要特性。虽然它们很可能不带任何电荷,但它们大都肯定具有自旋。

旋转是黑洞所能具有的第三个也是最后一个特性。黑洞的自旋也同质量和电荷一样，能在离黑洞很远的安全距离上被科学家们测量到。因为旋转黑洞名副其实地拖动自己周围的空间和时间，所以使这种测量成为可能。如果向旋转黑洞发送一些光束，在随黑洞转动的时空中，这些光束将根据逆行或顺行的不同，而产生不同程度的偏折。事实上，通过测量旋转黑洞周围各侧的光线偏折情况，就能推测出黑洞的全部自旋。自旋是黑洞结构所依据的仅仅 3 个数值中的第三个数值。

带电且旋转的黑洞

设想有一个简单的、不带电、静止的黑洞，就像图 6 所示的那个黑洞一样。如果开始使这个黑洞自旋，则围绕着奇点又形成第二个事件视界。由于黑洞具有两方面的特性（质量和自旋），所以它有两个事件视界。恰好跟带电荷的黑洞情况一样，围绕奇点也有两处其时间呈现出停滞。

如果使黑洞的旋转速率增大，内事件视界就逐渐胀大，而外事件视界就逐渐缩小。黑洞有可能出现的最大自旋，产生在两个事件视界合二为一的时候。如果促使黑洞再旋转得快一些，则两个事件视界将全部消失，只留下一个裸奇点。

虽然有关旋转黑洞的这些描述与我们对带电黑洞的讨

论大体相同，可是另外还有某些方面有着非常显著的不同点。在静止黑洞和带电黑洞这两类黑洞中，奇点都是一个单一的点。但是，如图 6 所示，旋转黑洞的奇点却是一个环。这个环状奇点位于黑洞的赤道面中，垂直于黑洞的自转轴。

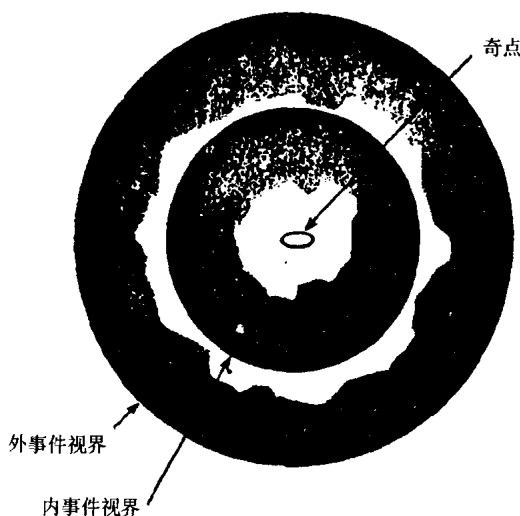


图 6 旋转黑洞的结构

旋转黑洞具有第二个（内）事件视界。如果黑洞的旋转速率增加，则内事件视界胀大而外事件视界缩小。当两个事件视界合一时，自旋达到极大值。旋转黑洞有一个环状奇点，这是与另外两类黑洞不同的。环状奇点位于黑洞的赤道面中，垂直于黑洞的旋转轴

在静止黑洞或带电黑洞中，任何人走向黑洞中心都要

被无限弯曲的时空撕碎。你无论从哪个方向接近奇点都要注定被毁灭。

然而在旋转黑洞中，你只有由侧面接近环状奇点时，才会注定撞击到奇点上。你只有在黑洞的赤道面中冲向黑洞中心时，才会被无限弯曲时空撕碎。如果你以任何其它倾角接近黑洞中心，就将穿过环状奇点而不会遇到无限弯曲的时空。穿过环状奇点完全不像穿过面包圈上的洞；你决不只是来到另外一侧。你进入了负空间，那里的引力是排斥性的。穿过环状奇点，你进入一个反引力宇宙。在那里，引力是把物体推上去而不是把物体拉下来！

旋转黑洞周围的时空被拖动的情况和环状奇点的奇特性质，是新西兰数学家克尔研究阐明的两项内容。克尔是成功地写出用质量和自旋两个量完善地描述黑洞的方程式的第一个人。因此，旋转黑洞有时也称为克尔黑洞。作为散布在我们银河系周围的大质量恒星的坍缩尸骸，它们才是我们真正期望要找到的那类天体。

到黑洞去旅行

在像黑洞那样的强引力源附近，引力改变了时间流逝和距离量度的方式。这种观念是所有这些引力理论的核心。我们想象有几位宇航员，他们冒险地深入到宇宙的这些奇妙的区域中去，在下面几页我们将跟踪他们的旅行。

从远处看黑洞

要了解在黑洞附近所发生的情况，一种研究方法是想象未来有一位宇宙飞船的驾驶员，他意外地遇见了一个黑洞。诚然，就我们假想的实验来说，宇宙飞船的方案并不是必需的。不过的确必须要相当接近黑洞才能了解到黑洞那里发生的情况。另外，如果你要探索黑洞紧邻区域的情况，也必须非常接近黑洞，才能向黑洞降落一些探测器，从而了解这些探测器发生了什么变化。

人们只能通过黑洞的引力感觉到它的存在，黑洞是不可能被看见的。光线不能从它那里逃逸出来，这也就是它之所以被称为黑洞的原因。远处的宇宙飞船首先感受到的明显效应是存在着微弱而无情的吸引力。宇宙飞船开始朝黑洞降落。可是这个吸引力不会有什么非常特殊的性质，因

为宇宙之中普遍存在引力，任何一个大质量天体都会使宇宙飞船的路线发生偏转。

要探索黑洞，就应该适当选择进入围绕黑洞运行的轨道，在掠过黑洞时，宇宙飞船的运动将阻止它坠向黑洞。飞船可以绕着黑洞运行并逐渐接近它，其方式同月球沿着轨道绕地球运行而逐渐接近地球一样。在遇到黑洞以前，飞船的运动轨迹是一条直线，黑洞的拉力使它偏离这条直线。精确测定黑洞这种吸引力有多大，就可以测定黑洞的质量。如果飞船在围绕黑洞的轨道上运行，那么宇航员就可以测量绕行黑洞 1 周所需的时间。黑洞的质量愈大，轨道运动就愈快（质量较大的黑洞对飞船吸引较强，飞船为了稳定在黑洞周围的轨道上，必须较快地运动。）。例如，如果在离黑洞 1 个天文单位的轨道上，飞船绕行 1 周需要 3.7947 个月，人们便可推断这个黑洞的引力比太阳强 10 倍，亦即它的质量是太阳的 10 倍。（一个天文单位就是地球到太阳的平均距离，等于 1.495985×10^8 千米。）这正是开普勒第三定律，天文学家用它来推算双星的质量。这里没有什么新东西。

唯一不同的是，如果向黑洞观看，宇航员就会发现有点奇怪的现象。宇宙中大多数 10 倍于太阳质量的天体是可见的，因而可以预测会看见在宇宙飞船轨道的中心处的某种恒星。质量为太阳 10 倍的恒星一般是一颗明亮的蓝色星。但是，我们这位宇航员却什么也不会看见，因为，他是处于围绕一个不可见天体运动的轨道上。从这艘宇宙飞

船的位置上看来，这颗黑洞本身的视角直径只有 0.08 弧秒，相当于在 15 英里（1 英里 = 1.6093 千米）以外去眺望 1 枚 1 角钱的硬币。即使黑洞可以看见，这位宇航员也需要利用 400 英寸（1 英寸 = 2.54 厘米）的大型望远镜才能够看见它的视面。

如果非常凑巧，宇航员也许能够以另一种方式来探测这个黑洞，他会看见黑洞背后的恒星射来的光线，这是由

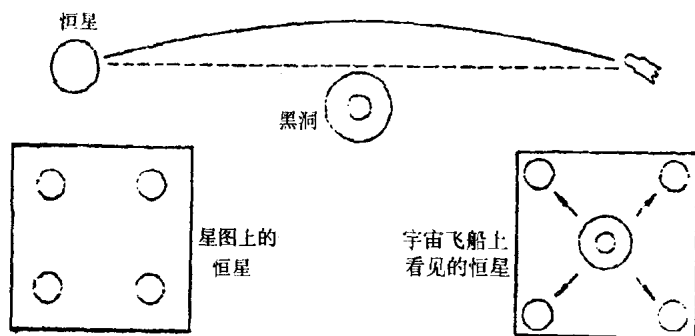


图 7 如果从远处观看黑洞，光线必定是绕过黑洞射到宇航员处。黑洞邻近的恒星看起来偏离了原来的位置

于这些光线经过黑洞时会发生弯曲（图 7）。但是，仅当在适当的位置上恰好有恒星的时候，他才能发现黑洞。根据爱因斯坦的理论，所有粒子，甚至包括光子，它们的运动路径都要受到引力的影响。因此，由于引力场的影响，光线的路径是弯曲的，其方式与地球使得抛在空中的棒球的轨迹发生弯曲并使它坠落一样。由于从遥远恒星射来的光线

经过黑洞近旁会弯曲，所以看起来这些恒星偏离了原来的位置。这些光线必须绕过黑洞行进方能到达飞船。日全食期间，日面边缘附近恒星的位置发生了变化，表明已经观测到了在太阳近旁这种光线弯曲的现象。因此，这个效应并不新奇，只是这个效应在黑洞附近应当非常大。

遗憾的是，在黑洞附近的宇航员能够用来发现黑洞存在的上述两种方法，都不适用于离黑洞非常遥远的地球表面上的观测者。显然，人们需要位于黑洞附近，进入围绕它运行的轨道。如果从地球上看来，由黑洞引起的光线弯曲是非常微小的，现在任何设备都不可能发现它。黑洞的观测必须基于黑洞同它周围物质的相互作用产生的现象。

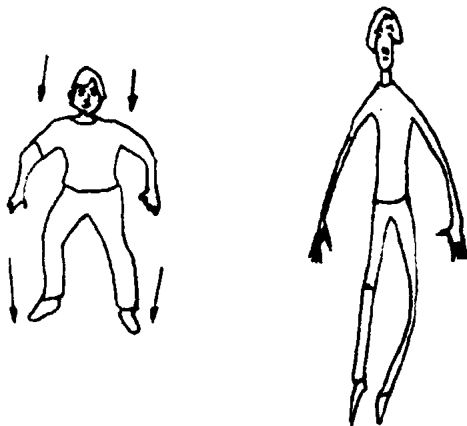
这样，我们必须深入黑洞来进行考察，只是简单地瞭望一下是不可能发现非常重要的黑洞性质的，因为没有很多的现象可看。我们的宇宙飞船必须向黑洞发射一枚探测器，然后看看会发生什么情况。

为了明确起见，下面，我将给出一些用数字表示的细节，这些数值将适用于宇航员去考察一个质量为太阳 10 倍的黑洞。由恒星坍缩而形成的黑洞其质量大致与此相同。在真实的宇宙中不大可能存在质量很小的黑洞。没有人能够想出一种方式来形成比恒星质量还要小的黑洞。按照一些人的想法，在活动星系的中心和类星体那里，可能存在着质量为 10^8 太阳质量以上的大黑洞，它们作为这些天体的能源。除了起潮力的强度以外，大黑洞周围所发生的事必在性质上与较小黑洞周围的情况是相同的。探测器向黑洞

降落时所碰到的第一个现象就是起潮力。

黑洞附近的起潮力

当探测器接近黑洞的时候，长时间内都不会发生什么异常现象。黑洞所特有的效应只是在非常接近黑洞时才显著，这并不值得惊奇。在宇宙飞船抵达黑洞附近以前的很



当宇航员接近黑洞时，他
身体各部位所受的引力之差
将在他身上产生一个作用力

当他再也抗拒不住这些
力的时候，在竖直方向上他就
被拉长，而在水平方向被压缩

图 8 起潮力使黑洞附近的宇航员的身体变形

(作用在他身体各部位上引力的差被夸张了)

长时间里,宇航员首先感受到的不舒服就是起潮力的影响。但是,与光线弯曲现象一样,起潮力是人们所熟悉的力,只不过在黑洞附近它增强到使人们感到不舒服的程度而已。

我们先探讨一下引力对人体产生的影响。当宇航员首先把他的双脚朝着黑洞降落的时候,或许毁灭性的灾难就开始降临到他的头上(图8)。他的双腿比他头部更加靠近黑洞,因而作用在两腿上的引力要比作用在头部上的强一些。这两个力的差就是引力的起潮力。如果无法抵抗起潮力,它就会把宇航员拉长成一个狭长的柱体。这个力离大质量天体越近,引力就越强。起潮力是两个天体,例如月亮和地球之间相互作用所共有的特性。潮汐效应产生了在海边生活的人们所熟悉的海潮。由于我们的两脚比头部更加接近地心,起潮力始终作用在我们的身体上。但是,在地球上起潮力非常微弱,因而没有造成任何严重的威胁。而在黑洞附近,它们要强得多。

起潮力的另一种作用如同紧身衣束缚在身上一样挤压着宇航员的两肩。宇航员身体的各部位都朝着黑洞中心坠落,尤其是他的双肩在下落时,黑洞的引力要把两肩拉在一起。仿佛一种无形的拉肢刑架把这位宇航员身体的各个部位都拉长。对我们这位英雄来说,命运确实有点可怕。他的骨骼和肌肉必须能够经受得住这些力的作用,才能免遭死亡的厄运。究竟在离黑洞多近的距离上,人还能够忍受这种力的作用呢?

乐观地说,人体能够经受得住10倍于地球重力的张力

作用而不致于断裂。宇航员抵达离 10 倍太阳质量的黑洞 3000 千米的时候，起潮力就达到这么强了。在他还没有冒险向黑洞再靠近一点的时候，便已死于起潮力了。由此可见，一位活着的宇航员，要去研究黑洞的性质是多么不容易啊！

非常大的黑洞应当是有利于研究的候选者，这是因为人们能够到达离这种黑洞更近的距离上而起潮力却还没有变得十分强大。如果人们研究的是比 10^4 倍太阳质量还要大的黑洞，在起潮力把人撕裂以前他可能已经进入黑洞内部。在星系的中心可能存在着如此巨大的黑洞。不过，较小的黑洞大概更为普遍，而且，无疑地将更容易被地球上的人类所发现，所以我将主要讲述它们。

起潮力是一种有利于我们去观测真实黑洞的现象。当气体向黑洞降落时，起潮力会使气体挤压，这种起潮力也就是使得我们想象之中的宇航员难以生存的那种力。气体被压缩就要变热。热气体将发射出像 X 射线那样的高能辐射，而这些辐射正是黑洞的一种信号。当然并非所有的 X 射线源都是黑洞，我们必须详细地研究每一个黑洞候选者，以排除一些其他可能的天体。

有些现象使得黑洞看上去好像是由爱因斯坦引力理论推断出来的最不可思议的杜撰物。可是，可怕的起潮力并不属于这一类现象。黑洞的实质在于存在着一个视界面，一个只能进去而不能出来的表面。在视界面上，人们必须以光速运动才能逃离黑洞，但是任何物体都不能运动得这样

快，所以不论什么物体一旦跨越这个无形的界面，它就不可能返回到外部世界中来。我们注视着探测器继续落向黑洞，以考察一下黑洞视界附近的情况。

向视界靠近

黑洞以两种方式影响它周围的空间和时间。黑洞附近的宇宙飞船同外部世界通信联系时，黑洞的引力就会歪曲它所发出的信号，阻碍信号的通过，并且大大歪曲时间的进程。视界就是黑洞的边界。一旦穿过它，进入了黑洞的内部，就永远被它牢牢地抓住，再也不能返回外部世界。视界是一个球面，它的半径依赖于黑洞的质量。幸而其半径非常小，因而黑洞也非常小。在数值上它等于以太阳质量为单位表示的黑洞质量乘以 2.95 千米。因此，10 倍太阳质量的黑洞，其半径约等于 30 千米，直径约为 60 千米。在星际空间中，这样小的一个天体是极其难以看见的，更不用说碰上它，由于黑洞如此之小，地球同一个黑洞相碰撞的机会更是微乎其微。

爱因斯坦引力理论的实质是，引力通过扭曲空间和歪曲时间来影响所有粒子。因此，对 10 倍太阳质量的黑洞进行探索，主要方法是把一些时钟降落到黑洞附近，看一看这些时钟将会发生什么变化。这些时钟的降落运动影响着时钟的走动情况，也影响着从它们发出来的信号。例如，由于运动，时钟就会变慢。（这是爱因斯坦狭义相对论的一个

结论，它与引力无关。)

这样，我们考察黑洞的假想试验方案必然是相当复杂的。由一位坚不可摧的宇航员操纵的探测器，带着大量的时钟开始做深入到黑洞内部的旅行。这些时钟准确可靠而且非常坚固，在靠近黑洞时能够承受住强大的起潮力。宇航员时而抛出一只钟，将它投入到围绕黑洞的轨道上去。当时钟进入轨道时，它相对于远处的观测者来说，其运动速度并不算太快，这样我们就可以从外面去监视它。这个濒临毁灭的探测器的运动会影响它的时钟和量尺测量的情况，将这种影响完全扣除以后，我们就可以了解到黑洞的引力是怎样影响时空的。在进行考察的过程中，远处观测者还要不断记下身边时钟指示的时间。

表1中汇总了我们跟踪黑洞探险时所看到的情况。在远离黑洞300千米，即10倍史瓦西半径的距离时，宇航员把第一时钟投入轨道。这时我们发现什么奇怪的现象呢？

在10个史瓦西半径的距离上围绕黑洞作轨道运动的这只时钟，出现了第一个奇特效应：它发射出来的光的波长发生了红移。这表明光子从黑洞附近的强引力场中摆脱出来的时候要损失能量，它们从短波高能光子转变为疲乏的长波光子，如同一个人在爬楼梯时要克服重力做功因而损失能量一样。能量的损失相当于频率的降低，也就是波长增加。红光的光子是长波光子，所以这种现象称为引力红移。

表 1 我们跟踪黑洞探险时所看到的情况

离黑洞中心的距离		红移量	相对的 时钟 速率	时 间 *	
千 米	史瓦西半 径的倍数			从宇宙飞 船来看	从降落的探测 器来看 **
1 天文单位	4.96×10^6	0	1	0	0
300	10	0.05	1.05	204 小时 33 分 50.1129 秒	204 小时 33 分 49.6681 秒
240	8	0.07	1.07	50.1135	49.6687
180	6	0.10	1.10	50.1141	49.6692
120	4	0.15	1.15	50.1148	49.669666
90	3	0.22	1.22	50.1150	49.669854
60	2	0.41	1.41	50.1153	49.670012
45	1.5	0.73	1.73	50.1155	49.670078
33	1.1	2.32	3.32	50.1157	49.670091
30.03	1.001	30.25	31.25	50.1162	49.070123
$30 + (3 \times 10^{-3288})$	$1 + 10^{-8289}$	$10^{4144} - 1$	10^{4144}	205 小时	49.670133
30	1	∞	∞	∞	49.67.133
15	0.5	—	—	—	49.670177
0	0	—	—	—	49.670200

* 右边两栏中未标出时间单位的数据是指 204 小时 33 分加上表中所列的秒的数值。

** 宇宙飞船保持在距黑洞为一个天文单位的轨道上，探测器由此出发，向黑洞径向竖直地降落，最右栏所列的时间是探测器降落到各个位置处时钟所记录的时刻。

表中“红移量”这一栏列出了时钟发射的光每单位波长的位移量，通常用字母 z 标记。（若时钟发射光的波长为 λ ，波长变化为 $\Delta\lambda$ ，则用算式表示 $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 。）因而，如果这

些钟是由波长为 5000 埃 (1 埃 = 10^{-10} 米) 的绿光照亮的, 那么当光行进到遥远的宇宙飞船上时, 它的波长要位移 250 埃 ($0.05 = 250/5000$)。这样的效应是可以发现的。250 埃的波长变化使得绿色光朝着光谱区的红端移动而变成黄光。

除引力红移外, 接近黑洞的时钟看起来还要变慢, 如在“相对的时钟速率”一栏中所标明的那样。这一栏列出了黑洞附近的时钟经历 1 秒之后, 遥远观测者的时钟所报出的秒数。因此, 离黑洞 300 千米的时钟每经历 1 秒, 在宇宙飞船上的时钟相应的读数将是 1.05 秒。黑洞附近的钟似乎是走得慢了, 于是一切事件也都进行得迟缓了。

再提一下, 引力红移和时钟变慢并不是很新奇的现象, 只不过在黑洞附近, 这些效应变得非常大而已。在其它场合, 白矮星、太阳以及哈佛大学杰斐逊物理实验室从地下室发射到顶楼的光束, 都已经观察到引力红移现象。这两种效应是有联系的: 如果你浏览一下相应的两栏, 就能注意到, 相对的时钟速率简单地等于 $1+z$, 其中 z 就是引力红移量。不同高度上两个原子钟的速率是不同的, 它们之间相关联的这种效应已经被一些商用客机上携带的原子钟在绕地球飞行时观测到, 不过在这种试验中观察到的主要效应并不是由引力产生的。同地球上有关实验所证实的效应相比, 黑洞附近的这些特殊效应只不过更加显著而已。

宇航员随探测器竖直降落抵达 300 千米处检验点需要经历的时间 在他所携带的时钟上同我们在远处的时钟所

数是不一致的。他说，他是在离开原有轨道之后的 204 小时 33 分 49.6681 秒把第一个钟放置在轨道上的。我们却认为他经历了略微长一些的时间才降落到那个位置上，他花费的时间为 204 小时 33 分 50.1129 秒，相差 0.4448 秒。我们的时钟和宇航员的时钟之间的半秒之差现在似乎还不重要，可是，当探测器愈接近视界面，所有这些奇怪的黑洞效应将愈大。

探测器继续向下降落，同时我们的宇航员更加接近他飞行使命的目标——视界面。这时引力红移变得更大了，在 120 千米处，红移量等于 0.15。而且照亮那些做轨道运动的时钟的绿光灯在我们看来却是黄色的，波长为 5600 埃，轨道上的时钟也按比例变慢了，它们走 1 秒，位于离黑洞安全距离处作轨道运动的宇宙飞船上的时钟就得走 1.15 秒。我们和那位宇航员时钟之间那种令人烦恼的半秒差别却变得更大了。

我们必须迅速地查看一下离黑洞 120 千米远处作轨道运行的时钟，因为它们的轨道是不稳定的。它们可能在轨道上停留一会儿，但是对圆轨道的任何微小偏离都会使得它们被黑洞俘获而吞没。随着宇航员接近黑洞，在他行进的道路不断地放置一些时钟到轨道上去，从这些时钟发射出的光的红移量变得愈来愈大。在 90 千米处，这里所描述的效应真正是名副其实的红移。照亮这些时钟的绿光在到达我们眼睛的时候，就变成波长为 6100 埃的红光。在 60 千米处由于黑洞强大引力的影响，这些时钟发射的光变成

波长为 7000 埃的红外光。我们必须用一种显像管来看它们，这是为用于越南战争而研制的一种装置，它可探测红外辐射（由于这种小装置可以改进望远镜的效果，所以在天文学中，它已经有了许多应用）。

不过，这种显像管只有在一定范围内才能很好地起作用，因为靠近黑洞时红移愈来愈大。在宇航员距离黑洞中心 30.03 千米，或者离视界面 0.03 千米（30 米）的时候，假想的照亮时钟的绿光波长将变为 150 000 埃，位于远红外区，超出了显像管的接收范围。难道是这样没有止境？难道这种红移的增长永远不会停止？是的！永远不会停止！光源趋近于视界面，光子的红移会无限制地增加。

随着红移的增加，另一个更加古怪的效应出现了。在光线红移增长的同时，由于相对的时钟速率等于 $1+z$ ，所以接近黑洞的时钟不断变慢。黑洞附近的事件进行得更加缓慢，需要长得多的时间。离黑洞 33 千米的地方，红移量等于 2.32，相对的时钟速率为 3.32。离黑洞这么近处的事件进行速率大约为其正常速率的 $1/3$ 。

离视界愈来愈近，时钟的变慢愈来愈厉害。沿轨道运动的时钟愈来愈慢地滴答、滴答……在视界处会发生什么情况呢？这时时钟需要在无限长的时间以后才能发出下一次的滴答声，一切活动都会冻结住，时间就中止在视界面上。

这位随之降落的宇航员情况又怎么样呢？他的时钟和我们的时钟，用图解方法描绘了表 1 中所说明的事件。随

着宇航员更靠近视界，他的时钟和我们的时钟之间先前的半秒之差就变得愈来愈大。如果我们监听一下他心脏的搏动，那么记录将会表明，他的心搏与他的时钟一起变慢。由于他的下落会冻结在视界面上，他似乎停止了下落，这好像观看一部慢镜头电影一样。在黑洞边缘处，这种减慢现象出现得非常突然。宇航员到达离视界距离为 3×10^{-8288} 千米以内时，我们的时钟才进展到 205 小时（为了写出 3×10^{-8288} ，我们必须在小数点和 3 之间放上 8287 个零，本书需要好几页篇幅才能写出那么小的一个数）。他的时钟停止走动，而我们的时钟却滴答滴答地继续走动。我们永远不会看见这位宇航员下落到穿过视界面。他将缓慢地愈来愈接近视界面，接近的速度愈来愈慢，但是他永远不会穿过视界面。

黑洞的别名冻结星

如果人们碰巧注视到一个黑洞在形成，就会看到一幅类似的变化图像。最初，恒星的坍缩进行得相当迅速。随着这颗恒星坍缩得愈来愈接近于视界面，从它发射出来的光的红移就愈来愈大（这里恒星的红移使得恒星逐渐变红变暗）恰好要达到视界面时，坍缩突然减慢，对于遥远的观测者来说，恒星自身的引力使得每一件事物的活动似乎一下子都变得缓慢了。坍缩实际上冻结在刚好不到视界面的位置上。

要记住，只是在极其靠近视界面时坍缩才会出现冻结，在这个位置上巨大的红移使得恒星看起来是完全暗黑的。只是在红移非常大的时候，才会出现坍缩的冻结现象。如果从恒星坍缩到半径为 1.5 倍史瓦西半径的时刻开始计算，那么经过 4.6×10^{-5} 秒以后，其红移值就要增大 10 倍，再经过 4.6×10^{-5} 秒，红移值再增加 10 倍，也就是原来的 100 倍。由于恒星是以光子形式发光，所以存在着一个时刻，这时恒星向外部世界发射出最后一个光子。详细地计算表明，就 10 个太阳质量的恒星坍缩而言，其表面坍缩到半径为 4.5 千米或 1.5 倍史瓦西半径以后不到 0.01 秒的时间内，这颗恒星发射出最后一个光子。坍缩的恒星就变为一个暗黑的天体，并且冻结在视界面上。因此，黑洞还有另外一个名字：冻结星。

视界面是一个极限面

由于光子不能从视界面上射到外部世界中来，所以人们不可能看见视界面上发生的任何事情。随着人们的视线愈来愈接近视界面，时间就无限地变慢，时钟愈走愈慢，似乎是滴答，滴答，滴……答，滴……最后再也听不到它的答声。这个似是而非的位置就是视界。

通过泽诺提出的一个假设可能会更清楚地阐明视界作为一个极限的概念。假定，某个人要经过一扇门，而他距离门为 6 英尺（1 英尺 = 12 英寸 = 0.3048 米）远。出于只

有他才最了解的某种原因，他决心缓慢地接近这个门，他每一步只走剩下距离的一半。最初，这似乎好像是一种适当的办法，他第一步朝门跨了 3 英尺，因而前进了。但是，如果他按照这种规则进行这种游戏的话，他就永远也通不过这扇门。第二步后他还剩下 1.5 英尺远，第三步后剩 9 英寸，第四步后剩 4.5 英寸，第五步后剩 2.25 英寸，如此继续下去。他每一步只能接近门，却永远也不会有一步使他能越过这扇门。当人们朝着黑洞方向看时，就出现同样的事情。如果人们试图注视某人进入黑洞，由于他行进得愈来愈慢，似乎需要愈来愈长的时间他才能够到达那里。

从外面看去视界似乎是一种非常奇特的地方。在视界上时间变为停顿的这种观念是莫名其妙的，它完全不符合通常的概念。通常，人们认为宇宙万物总是在不断变化的。那么，视界究竟是一种什么样的地方呢？为了考察视界以及视界以内，即黑洞内部世界的性质，我们不得不离开真实的世界，而进入皮格马利翁式的虚幻臆境中去。那些降落到视界以内，企图从实验上验证即将介绍的理论结果的人，都永远不会返回来告诉我们，我们的理论是否正确。

仍然有一些适当的理由使得人们沉迷于这种理论的发挥，想象到视界以内去旅行究竟是什么样子。在视界处时间处于停止状态使得人们认为，在视界面上，爱因斯坦理论可能失效。如果真是这样，那么黑洞本身的存在就将是悬而未决的问题了。而且，在宇宙中别的地方，爱因斯坦理论的正确性也是可疑的。但是，人们假定，在宇宙的任

何地方，包括视界附近，这个理论都是正确的。

原来，在视界附近时空的奇特性质，例如时间变为停顿的观念，只是我们外面人去看的结果。如果我们跟随着勇敢的宇航员穿过视界，那么就会发现，视界毕竟还不是那样一种奇怪的地点。然而，我再重复一遍，下面要谈的仅仅是理论上的。因为凡是进入黑洞的人，都不能再出来告诉我们那儿的实际情况（有些人推测，实际上人们能够从黑洞中出来）。

通过视界

再看看表 1，这次请注意宇航员的时钟与外部观测者的不同，他不会看到他自己朝着黑洞的降落冻结在视界上。他离开宇宙飞船以后 204 时 33 分 49.6681 秒，他就到达离黑洞 300 千米远处，他的钟同后面的宇宙飞船上的时钟大体是一致的。仅仅在一刹那之后，在 49.670133 秒，他就下降穿过视界。当他接近黑洞的时候，他看不到时钟有丝毫减慢。他不可能看见冻结星的面，因为冻结星完全是暗黑的，看起来好像一个“洞”。在他降落的时候，他可以看见周围所发生的一切事情，它们的运动并不是像外面人们所看见的那样缓慢，而是一切都在正常进行。当他下降通过视界面时，由于不断增长的起潮力的作用，他可能不得不忍受着一些痛苦。但是这种起潮力在视界上会保持在有限的范围内，因而一个身体相当结实的宇航员和结构坚

固的探测器会安然无恙。

需要再三强调，在视界处，一个下落并穿过视界的人不会经受任何不可思议的物理效应，在视界处没有任何迹象警告里面会有危险。起潮力也不是无限大，在他进入黑洞以前，起潮力不会把他撕裂。请看一下表 1 中所列的宇宙飞船目睹黑洞探险的情形。看见了吗？根据探测器的观点，在一个恰当的时间之后，它完全平安下落而通过视界。

在视界处，宇航员没有任何病态感觉，这意味着爱因斯坦理论在那里并没有失效。只是我们从外面看，才会出现时间停顿的奇怪现象。如果我们采用另外的观点，就不会出现无限红移和时钟冻结现象。这些现象并非总是存在的，它只是我们从外面观测的结果。爱因斯坦的理论仍然是正确的，而且，还可以正确地利用它来预言直至视界以及穿过视界所发生的事情。

在一个很长的时期，用来描述我们所研究的对象的术语不是黑洞，而是冻结星或坍缩星。我们现在看到，黑洞这个术语是恰如其分的。以前我们已经讨论过“黑洞”这个术语是很恰当的。从外面看，如果人们注视着恒星的坍缩，这颗恒星就会在 $1/100$ 秒或更短的时间内成为不可见的天体。人们甚至不能以探照灯照射它来观看它的表面，因为探照灯的光会在向内行进的道路上赶上坍缩。从入射光的观点看，坍缩是不冻结的。入射光要被这个洞吞没掉。人们无法看见这颗冻结星，它是暗黑的。

如果有这么一位愚蠢的宇航员，他企图证明在空间中

那个地方只是有一颗冻结星，而不是一个黑洞，那么，类似的命运便会降临在他身上。如果他看见坍缩一直尚未冻结，而坍缩星体总是刚好保持在他的前面，就试图用勺取出一块冻结星物质，那么他不仅取不出来，而且如果用力太猛，自己也会穿到视界之内，从他外部世界朋友们的视野中消失。这个天体的的确确真是一个洞。现在采用的术语就是黑洞。如果人们掉进它里面，他就会更加往里坠落，一直坠落到……

黑洞的内部

在视界以內存在一个严重的问题。谁一旦在视界以內，他就永远不可能出来。因而视界就好比宇宙中一种只能单方面通行的关卡，任何东西，无论它是光、空间探测器、电视机、石头、摇椅，还是不幸的宇航员，它们都只能沿一个方向行进：向內！黑洞研究中某些重要的新领域启迪我们，视界的单向性可能有例外。霍金的研究表明，黑洞最终将会蒸发，但是，对于10倍太阳质量的黑洞，这要经历 10^{66} 年。黑洞研究的这个新领域还包括黑洞的“镜像”——白洞——的讨论，在白洞內，物质向外喷出。

视界的单向性迫使人们依靠理论来探索黑洞的内部。理论计算虽然脱离现实世界，但并非毫无意义，它提供了黑洞的理论性质，并且引导我们去研究在哪些情形下爱因斯坦方程是适用的。由于这些原因，让我们在理论计算的

框架内跟随探测器向黑洞中心行进(现在我们使用探测器,因为用一个人去做这些假想的但是令人毛骨悚然的试验,其想法是太残酷了)。

这个探测器无可抗拒地被拉向黑洞中心。随着它接近黑洞中心,起潮力变得愈来愈强。起潮力无限地增强,因而在探测器实际上还未到达中心以前,就被起潮力摧毁了。探测器可能为反抗引力而挣扎,开动它的火箭发动机东冲西撞,企图以此来逃脱毁灭的命运。不过,它只能使这场不可避免的厄运推迟一个很短的时间。引力的魔爪已抓住了它,使它必然向黑洞中心坠落而毁灭。在10个太阳质量的黑洞中,它坠落得非常快,如果它不开动发动机来企图避免这场灾难,那么,在它通过视界以后67微秒内,它就坠落到黑洞中心了。

黑洞中心究竟是什么?爱因斯坦理论在这里实际上失效了。这个理论向我们展现出一个非常离奇的现象:在黑洞中心存在着一个奇点。奇点是这样一种点,这一点包含着黑洞的全部物质,其体积为零,因而物质密度为无穷大,起潮力也是无穷大。显然,存在着奇点是很荒唐的事情,不过,理论就是这么说的。

在黑洞中心存在一个奇点的观念使许多物理学家感到不安。当一个理论在其本身推出的模型中出现无穷大的时候,自然就会令人合情合理地感到:这个理论是错误的。标准黑洞理论是建立在爱因斯坦引力理论基础上的,因而一个标准黑洞在其中心有一个奇点。许多人已经尝试修改爱

因斯坦引力理论，以便去掉这个奇点。

然而，从某种程度上来说，这种修改只是一种题外话。请再次记住，我们所描述的只不过是一种皮格马利翁式的臆想而已。我们想象着跟随一位宇航员或者探测器进入黑洞，其全部目的是试图了解一下在黑洞内部的什么地方爱因斯坦理论失效，尤其是在视界上它是否失效。因为降落到视界里面的任何东西都不能再出来，所以视界以内所发生事情对外部世界没有影响。视界把黑洞内部同我们的宇宙完全隔离开来，因而那里所发生的任何事情都不会影响我们。

黑洞在哪里

黑洞真的存在吗？直到现在，我们考察的只是理论上的天体模型世界中的一员。黑洞是令人兴趣盎然的天体，不过，在人们对于神秘的视界非常感兴趣以前，应当力图去弄清现实世界中是否存在着这样一些天体。由于我们对于寻找的这个对象已经有了一些想法，所以，与寻找中子星相比，寻找黑洞的目标是更加集中了。然而，在某些方面，情况是相似的。例如，先证明了黑洞是可能存在的（1916年，史瓦西），然后又证明了大质量恒星实际上可能演变成黑洞（1939年，奥本海默和斯奈德尔）。现在已存在可以观测到它们的很大可能性。

从恒星从始至末一生的一幅粗略的总的图像，可以得出结论，大质量恒星可能以黑洞来结束其一生。概括起来说，在恒星生命结束的时候，它已经燃完了它的全部核燃料，不再能使其内部保持足够高的温度以支撑住其表面层，因而它就要收缩。如果恒星遗留下一个很小的残骸，由于简并压力可以支撑星体，这颗已死亡了的恒星就能够阻止完全坍缩。简并压力并不是由热运动引起的，所以即使恒星冷却了它还会继续起作用。因而，小质量的恒星残骸以白矮星或者中子星而告终。

但是，如果一颗死亡了的恒星的质量比某个极限值（或者称为临界质量）还要大，那么，恒星的重量就会压倒简并压力。简并压力完全不会强大到能够支撑住质量大于某个极限值的、冷的、已经死亡了的恒星。临界质量的精确值是一个有争议的问题。只要广义相对论正确，临界质量不会超过4倍太阳质量，大概是太阳质量的2.5倍。许多恒星开始演化时拥有多于临界质量的物质。为了避免成为黑洞，在红巨星阶段它们必须抛弃质量。虽然像红巨星那样的恒星会抛掉物质，但是那些最大的恒星可能不会抛掉足够多的物质，以避免坍缩的最终命运——黑洞阶段。天文学家不能完全断定大质量恒星一定要变成黑洞。

黑洞可以有各种大小，但它的类型却是有限的。黑洞的特性是指它的质量、自转和电荷。因此我们可以寻找各种质量的黑洞。然而如果我们以从大质量恒星演化而来的黑洞为目标，则搜索黑洞就会容易一些。人们对这类黑洞的起源是比较了解的。此外，在双星系统内，黑洞天体可以从它的伴星吸取物质并发射X射线，而X射线我们是可观测和分析的。通过对双星系统进行分析，我们获得了黑洞存在的最好证据。

寻找不同质量的黑洞也是可能的。远小于恒星质量的小黑洞有可能在宇宙开始时大爆炸的引力混沌中形成。70年代研究黑洞的一个引人注目的结果是小黑洞最终会蒸发的理论，但是还没有人发现正在蒸发的小黑洞。质量比恒星大的黑洞也可能存在。这些大黑洞可能为在巨大的星团

中观测到的 X 射线源提供能量，它们也可能是给类星体供应能量的“发电站”。如果整个宇宙的膨胀停止的话，宇宙就会是一个黑洞。

但是，黑洞模型中的这些矮子和巨人是难于明确认证的。我们对恒星和双星系统的了解比对小黑洞、星团或星系中心的超大质量天体、或宇宙本身的了解清楚得多。让我们转到寻找黑洞最有希望的地方：双星。

分光双星

如果黑洞是不可见的，那么又怎样能够找到它们呢？黑洞对它周围最简单的影响是使得接近它的火箭、行星、其他恒星以及任何物体都朝它降落下去或者绕它作轨道运动。如果稍微改变一下以前我们关于绕黑洞作轨道运动的宇宙飞船的例子，用恒星代替宇宙飞船，那么黑洞就能够被发现了。我们可以看见这颗恒星而且发现它绕某个天体作轨道运动，但是我们却不能看见它绕转的那个天体。所以，这颗恒星是在绕一个黑洞作轨道运动。

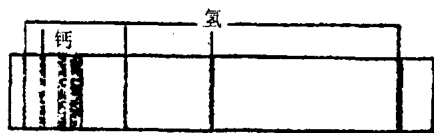
如果我们在近处看去，这个图像既美妙又简单。可惜，恒星是非常遥远的，从远处眺望，情况变得不太确定。如果恒星离我们几十或几百秒差距（1 秒差距 = 3.26 光年 = 308 570 亿千米），我们又怎能发现它在绕着某个不可见的伴星作轨道运动呢？我们需要对星光中的信息作严密的分析。有两个重要的问题需要回答：首先，我们如何知道这

颗恒星在作周期轨道运动？又如何知道这颗伴星确实是一颗不可见的天体，而不是一颗很微弱的恒星？难道仅仅是由于我们所能看见的那颗恒星的星光遮掩而不能被看到？

为了回答这两个问题，我们必须分析一下这颗恒星的光谱。与太阳光类似，星光也是各种颜色光的混合物。为了拍摄恒星的光谱，我们使星光色散，分解成各种不同颜色或者不同波长的光，然后把这个结果拍摄下来。图 9 是恒星光谱的示意图。用其他方法，我们也能够确定恒星的颜色。我们对于恒星所知道的一切都是从它的光谱和颜色来确定的，这是因为我们从恒星所接收的唯一信息就是它的辐射——光、射电波、X 射线以及其他形式的辐射。



较热星的光谱



较冷星的光谱

图 9 恒星光谱示意图

图 9 所示的恒星光谱中最显著的特征是一些横穿它们的暗线。因为光谱中光的颜色从左端的蓝色逐渐变化到右端的红色，所以这些暗线表明，在那些特定的颜色处，恒星发射的光要少一些。暗线的出现是由于在恒星表面层中一些特定的原子吸收了光，使它不能到达我们这里。

从这些暗线我们能获悉些什么呢？从它们的图像我们可以了解这颗恒星属于哪一类。人们可以将恒星的光谱进行分类，从这种分类，我们可以推断恒星的温度、大小和光度。

恒星的温度是决定其光谱外貌的主要因素。恒星光谱的温度分类用一些字母表示：*O*、*B*、*A*、*F*、*G*、*K*、*M*。由于历史原因，字母的排列顺序有点乱。例如，图 9 中，下面的光谱是一个 G 型光谱。左边的两条极其暗黑的谱线是由电离钙原子产生的。电离钙原子主要存在于与太阳有相同温度的恒星中，太阳就是一颗 G 型星。图中上面的光谱是一颗较热的 A 型星的光谱，它没有钙线。

分光学家能告诉我们的不仅仅是恒星的温度，还有更多的知识。光谱分类的技术已经进展到这样一种程度，通过光谱的分析，就能确定恒星的大小，是超巨星、巨星或矮星。如果能够确定恒星的温度和大小，我们也就能够确定恒星的光度。

现在，我们知道该如何来回答关于一颗恒星带有一颗不可见伴星的第二个问题了。我们怎样知道这颗看不见的恒星是一颗微弱的伴星，还是一个黑洞呢？我们先确定能

够看见的那颗恒星的光谱类别，从它的光谱类型，可以确定其光度。然后，我们就能够确定，它的伴星必须微弱到什么程度才能保持看不见。于是，我们可以问：“这颗伴星这样暗，是否合理呢？”

但是，我们又如何知道那里正好有一个伴星呢？这颗恒星沿一个标准的椭圆轨道绕黑洞运动，看起来，它犹如在黑洞附近不断地摆动。而我们离这个由恒星与黑洞组成的双星系统非常遥远，不能够看见恒星的这种摆动。对于某些双星，人们能够真正看见恒星彼此绕转。但是，没有一个黑洞候选者能经得起这种分析的检验。我们必须再一次依赖于光谱帮助。暗线精确的波长或颜色会告诉我们这个答案。如果暗线波长随时间变化，也就是说，如果谱线的波长出现变化，然后又变回来，我们就知道这颗恒星正在一会儿接近我们，一会儿远离我们交替地运动。如果它正在作这种形式的运动，它必定就是在绕着某个天体作轨道运动。图 10 表示出观测天文学家应当看见的现象。

多普勒位移

像图 10 所示的一种观测现象是如何告诉我们存在着一个伴星呢？告诉我们这颗可见星在轨道上运动的现象正是它的光谱中暗线的波长和颜色的变化。这种颜色的变化是由多普勒效应引起的。从向着观测者运动的恒星射来的光的颜色看起来比它离开时的颜色要蓝一些，而远离观测

者的恒星射来的光看起来要红一些。例如，如果两位天文学家分别在两个行星上观看同一颗恒星，这颗恒星向着其中一个人运动而远离另一个人，那么，他们两人看到的光谱是不同的（图 11）。在右面的天文学家看见恒星正在接近他，他接收到的光谱是蓝移的；而左边的天文学家看见的光谱是红移的。光谱线的这种位移把恒星的运动同它光谱中光的波长以及颜色联系起来了。

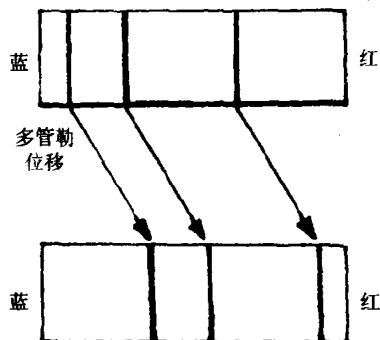


图 10 恒星光谱多普勒位移示意图

在两个不同时间拍摄同一颗恒星的光谱，如果两个光谱显示出光谱线的波长（或颜色）发生了变化，那么，这颗星就是双星系统中的一个子星。当它绕另一颗伴星作轨道运动时，它交替地朝向我们或远离我们运动。

是什么原因引起了多普勒位移呢？我们来研究一下图 12 中所示的地球上的一个类似的例子。设想一辆警车顺着

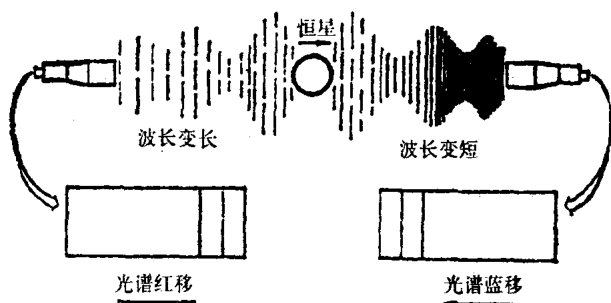


图 11 光谱红移与光谱蓝移

恒星光谱中暗线的波长（或颜色）的变化取决于恒星的运动，这使得天文学家看到恒星光谱中的多普勒位移。请对照图 12。

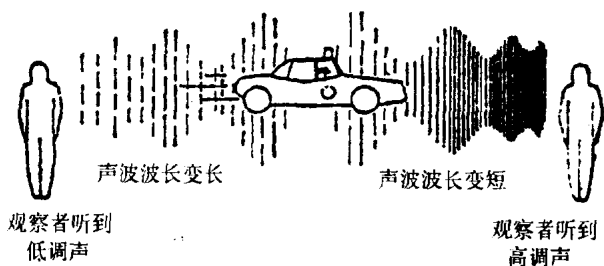


图 12 人行道上的行人能够听到一辆经过的警车的警报器中发出声音的多普勒位移

街道行驶，类似于恒星通过空间运动。警车装有一个警报

器，将它的音调调到中音 C，我们研究一下在人行道上的两个人所听到的音调和警车里面的人听见的音调。警车向右边的观察者接近，警报器发出的声波趋向于堆积起来。警车追赶着它所发出的声波。于是，右面的观察者感觉声音的波长在缩短，他听到高于中音 C 的音调。与此类似，这辆警车飞速地离开左面的观察者，他感到声波好像在铺开，波长变长了，听见一个音调较低的声音。而坐在警车里的人既没有感觉到声波在伸长，也没有觉察声波在缩短，他听见的就是中音 C。（乐声的音调同它的波长有关。波长较短的声音听起来音调较高，而波长较长的声音听起来音调较低。）

多普勒位移的程度是由运动物体的速度决定的，在上面的例子中运动物体就是警车。警车运动得愈快，声波堆积（或铺开）就愈厉害，结果波长变化也愈大。原则上，一个听力很好的盲人能够确定警车行驶的速度的快慢。他能够辨认出他听到的音调，而且在他知道警报器调到什么音调以后，他就能确定这辆警车的行驶速度。当一辆警车在马路上行驶经过你身旁的时候，你可以听见警车警报器音调的变化。不妨试试。

实际上，天文学家研究的是在不同时间拍摄同一颗恒星的光谱，随着这颗恒星绕它的伴星作轨道运动，当它朝着地球运动的时候，光谱线就向光谱的蓝端移动，因为在此情况下，光谱被恒星的运动所压缩。当这颗恒星经过地球和其伴星之间时，我们就看不到光谱线的移动。而当恒

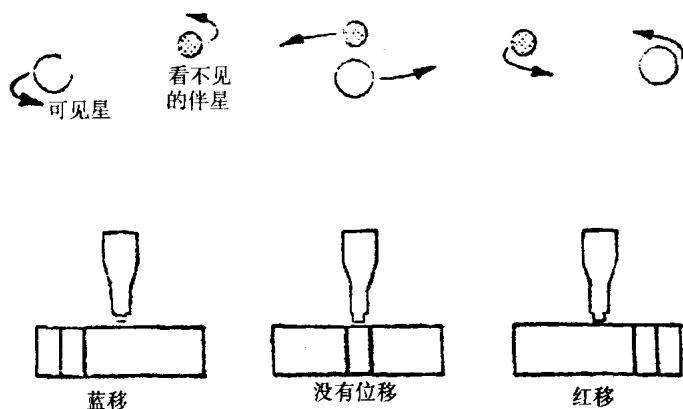


图 13 单线分光双星光谱变化示意图

其中一颗星绕着另一颗暗伴星作轨道运动。当可见星在其轨道上朝向我们和远离我们运动时，它的光谱就显示出位移。

星正在远离地球运动的时候，我们就观测到红移。这整个图像见图 13。人们做这类研究工作时，必须能够测量光谱线准确的波长。这种测量可借助于将一个固定光源的光谱拍摄在同一张照相底片上来进行。在一颗恒星的光谱中如果呈现出如图 13 那样的谱线位移变化，那么，这颗恒星就称为单线分光双星。“单线”是因为人们只观测到一颗星的光谱；“分光”是因为利用了分光镜来确定所发生的情况；而“双星”是因为光谱线的移动方式表明了在这个系统中存在着两个天体。我们所见光谱的这颗恒星正在绕着某个天体作轨道运动。

御夫座星的研究史

前面的讨论也许会诱导人们得出这样的结论：似乎所有单线分光双星中都有黑洞。下这种结论是为时过早了。我们关于单线分光双星所了解的一切只是知道这个系统中包含着另外一个或一些天体。实际上这个天体是不是黑洞是一个需要进一步仔细分析的问题。每一种情形都必须单独考虑。研究工作者必须问：“是否存在着一种不涉及黑洞的方式来解释在这个系统中所观测到的各种现象呢？”就每颗的恒星自己来说，论点是稍有差异的。

从一个特殊的候选者——御夫座 ϵ 星——开始来寻找双星系统中的黑洞。我从它开始不是因为御夫座 ϵ 星是最好的黑洞候选者，而是因为它不是最好的候选者。但它阐明了进行搜索的一些基本的物理规律。我不抽象地阐述这些基本规律，而是将它们应用于具体的系统。此外，这个系统可能包含一个黑洞。但是，证据还不很充分，天文学家并不认为它一定包含一个黑洞。

御夫座是一个相当容易识别的星座，它由一组亮星组成，状如五边形，位于猎户座北面。在1月份的晚上，它几乎在我们的头顶上空。五车二是御夫座中的一颗亮星，就在五车二的南面有3颗星聚在一起，其中最北面的也是最亮的1颗就是 ϵ 星。这是1颗非常特殊的分光交食双星，它的光谱线移动的方式几乎同上面所描述的一样。除此之外，

每隔 27 年，当伴星或者叫做辅星经过明亮的主星前面的时候，主星就变得较暗弱。所有的研究者都一致认为辅星包含着一个尘埃云，当伴星经过我们和主星之间时，它挡住主星的一些光，因此发生交食现象。在交食期间，而且也只有交食期间，人们可以看见第二条光谱，它十分类似于主星的光谱。目前还不清楚这第二条光谱是否意味着伴星实际上自己在发光。在交食以外，伴星是完全看不见的。现在人们必然要探究：位于巨大的尘埃云中心的这个看不见的伴星会不会是一个黑洞？

为了分析问题，我们必须根据可以得到的资料，尽我们可能来确定伴星的性质。尤其是我们需要知道它的质量。我们了解到些什么呢，由于在主星的光谱中出现了多普勒位移，我们就知道主星被绕着它运动的伴星吸引。我们可以估计伴星施加的引力的大小。为了从引力的大小求出伴星的质量，我们还需要了解更多一些关于双星是如何运转的知识。

彼此作轨道绕转的两颗星是通过引力把它们连结在一起的，为了使这两颗恒星不致于沿相反方向飞出去所必需的引力的大小取决于它们在轨道上的运动速度。快速运动的恒星需要很强的引力才能使它们连在一起而不致散开，慢速运动的恒星所需的引力就小些。根据万有引力定律，引力的大小取决于轨道的大小和两颗恒星的质量。恒星的质量愈大，引力就愈强；恒星之间的距离愈大，引力愈弱。因此，如果两颗星彼此快速绕转，且相隔的距离很大，我们

就可以推断，它们的质量一定很大，因为只有大质量恒星才能将强大的引力施加到远距离的地方。

于是，如果知道了轨道的大小和周期，人们就能确定双星系统的质量。测定周期是容易的，只要不断拍摄光谱并观测光谱线来回的位移，光谱线位移一周的时间就是轨道运动的周期。而位移的大小表现了恒星接近和远离我们运动的缓急。假使知道恒星是正朝着我们运动或是运动方向同视线方向成一角度，就能确定轨道运动的速度。这样，知道了恒星在轨道上的运动有多快以及它绕转一周的时间，人们便可计算轨道的大小。

现在人们知道了两颗星的总质量。有时，人们看到相互绕转的两颗星，并且能辨别其中一颗有较大的质量，即较大的惯性。但是，如果人们能看见双星系统内的两颗星，那么两者中肯定无一黑洞。在单线分光双星如御夫座 ϵ 星或任何其它的黑洞候选者中，人们需要估计可见星的质量。知道了双星系统的总质量，剩下的就是看不见的恒星——黑洞候选者的质量。

由于在分析中包含有一些假定，不同研究者对御夫座 ϵ 星系统得到不同的模型。但是，对于看不见的伴星，在每人求得的数据中，最小的质量数据是 8 个太阳质量。1 颗 8 倍太阳质量的主序星在食甚时应该被看得到，所以伴星不是一颗正常的主序星，白矮星或中子星很暗弱，在食甚时看不到，但白矮星和中子星的质量都不可能达到 8 个太阳质量。乍一看来，伴星质量要足够大，又要保持看不见，唯

一的可能是一个 8 倍太阳质量的黑洞。

但是且慢！可见星的掩食持续了两年之久，而 8 倍太阳质量的黑洞体积太小，不能产生任何可见的交食现象，更可以肯定不能产生持续那么久的掩食。伴星大概被一个尘埃云围绕着，尘埃云产生了掩食。一些模型在细节上有差异，这个尘埃云是球状的、盘状的、环状的，还是长方形的？无人知晓。不管它是什么形状的，它总能遮住一个 8 倍太阳质量的主序星，使我们看不到。在这个尘埃云中央的天体可能是黑洞，但并非一定如此。有没有任何其他较为明确的迹象可以供我们用来证认双星系统内的黑洞呢？X 射线天文学可以提供失去的线索。

X 射线源和黑洞

作为黑洞的一个候选者，御夫座 ϵ 星提出来的一个基本问题是难以识别黑洞和包围在尘埃云中的正常星。根据可见主星光谱线的位移，我们可以断定那里存在着另外一颗星，它吸引着主星绕转，引力数值的估计表明这颗伴星的质量足够大，以至它是一个黑洞，而不是白矮星或者中子星。但是，这颗伴星确实是一颗已经演化结束的恒星吗？如此巨大的质量使得它正好是一个黑洞？或者它只是被一个巨大的尘埃云遮掩的正常恒星呢？御夫座 ϵ 星没有提供与这个问题直接有关的任何证据。可能最终总会得出答案的，不过这只有在详细建立了一系列模型之后才能得出答

案。在寻找黑洞方面，现在的注意力集中在这样一些证据上，这些证据能够证明我们所感兴趣的恒星系统包含着一个已经演化完了的恒星。中子星和黑洞就是这种天体，它们都非常小，因而在文献中，人们常常称它们为坍缩天体。不过严格说来，只有黑洞才是完全塌缩的天体。

什么现象是坍缩天体产生的，而是通常恒星所没有呢？塌缩天体是非常小的，直径只有几十千米，也许最多为几百千米；而大质量恒星是非常大的，直径为几百万千米。请读者回忆一下，一个去黑洞探险的宇航员，在他离黑洞非常近时那种可怕的命运。当宇航员向黑洞降落时，他身体的各个部位都要向着同一点坠落，也就是说他的两肩、头部、双脚，以及整个身体都朝中心坠落，他会被引力这种无形的紧身衣压扁。宇航员的整个身体都会被压缩，压缩力是如此之强，以致于在探索一个恒星质量规模的黑洞时，利用现代技术所建造的任何实际的空间探测器都会被它摧毁。

当气体和尘埃绕黑洞旋转而且趋近于黑洞的时候，它们也会以宇航员被压扁的同样方式而被挤压。气体被挤压时温度就会增高。随着气体向黑洞降落，气体绕黑洞的旋转运动愈来愈快，它们被压缩得愈来愈厉害，温度就变得愈来愈高。这种下降的热涡旋气流的温度和密度最后变得足够高，当它们接近这个坍缩天体的时候就会发射 X 射线。详细的理论模型进一步肯定了这种图象：如果空间某处有一个黑洞，而且降落在它上面的气体有着源源不断的

供给，那么，这些被压缩的旋涡气流在几乎要到达视界面之前就会产生 X 射线。天文学家能够探测由黑洞压缩的下降气流产生的这些高能信号。

X 射线天文学

为搜寻黑洞提供了一个主要手段的 X 射线天文学现在正处于发展之中。在 60 年代，X 射线天文学的全部进展都是利用送到大气层以外的仪器取得的。X 射线不能穿透地球大气，所以需要利用火箭或者卫星到大气层以外去观测。

当人们刚刚开辟一个领域并且还不知道是否会发现什么重要现象时，火箭是非常有用的工具。无论在耗费资金方面，还是在将探测仪器装配起来所耗费的时间方面，火箭都比卫星节省。如果别人已经造好探测仪器，则仅需 6 个月的时间就可以进行火箭试验。可是就卫星而言，从最初提出建议到发射往往要经过 5 年的时间。但是，火箭有很大的缺点，一次典型的火箭飞行观察时间大约只有 5 分钟。

多次火箭飞行累积的总的观测时间仅仅略微超过一个小时，只是用 1 个小时的时间来观察星空，可以想象我们对它的了解是多么的少啊。可是就凭借这 1 个多小时，X 射线天文学的火箭时代已取得了非常丰富的成果。1969 年，随着“乌呼鲁”卫星的发射，火箭时代接近尾声。这第一个 X 射线卫星天文台，大概是科学史上最富成果的冒险之

一（它的名字来自它发射的时间和地点。它是在肯尼亚独立 5 周年那天，从肯尼亚海岸发射的，“乌呼鲁”是斯瓦希里语“自由”的意思），它在 X 射线波段范围内搜索天空。“乌呼鲁”卫星已经提供了全面的 X 射线源表，它包含约 200 个 X 射线源，其中一半位于银河系内。虽然命名为高能天文台的卫星以及在 70 年代后期发射的其他卫星，发现了更多的 X 射线源，并且为“乌呼鲁”卫星首先发现的那些 X 射线源提供了更多的信息，但首先揭示银河系中种类繁多的 X 射线源的正是“乌呼鲁”卫星。这些 X 射线源中有一些可能是黑洞。

在银河系内，几个 X 射线源是同其他形式的死亡恒星有关的。有些源是气体云，它们是恒星外层膨胀扩散后的产物——超新星的残迹。有几个源是温度非常高的白矮星。而大多数 X 射线源是同两颗星互相作轨道绕转的双星系统相联系的。这些双星系统中许多含有中子星，X 射线脉冲星就是一个例子。而有几个双星系统可能包含黑洞，它们是值得详细研究的。

闪烁 X 射线源

就搜寻黑洞而言，有几个 X 射线源特别有趣。这些 X 射线源闪烁很快，强度在千分之几秒时间内呈现变化。在银河系所有的 X 射线源中，只有几个属于这种类型。天鹅座 X-1 和圆规座 X-1 是研究最深入的两个。这些 X 射线源

的闪烁性质证明了 X 射线发射区非常小，大小和黑洞周围气体旋涡的内边缘一样（我下面将讨论这个结论的根据。）我们回想一下御夫座 ϵ 星，由于没有说明它不是 1 颗大的演化着的星体的理由，它作为黑洞的候选者就变得无望了。

为什么 X 射线的闪烁提供了关于 X 射线发射区大小的信息呢？试想，当一个天体亮度增加 1 倍时，那里会发生什么变化？为了使亮度翻一番，要么是发射气体云的亮度增加了 1 倍，要么是另一个气体云开始了发射。这种变化是在很短的时间，例如 0.05 秒钟内发生的。无论是哪种原因促使发射区突然产生了辐射，必然有某种信息要从激发源传递给响应的气体，也就是从产生能量的地方传送到将能量以 X 射线形式辐射出去的气体中。如果 X 射线源是一个位于吸积盘的内边缘处的小球体，它就必须在那样短的时间间隔内压缩或加热，而使之压缩或加热的声波必须在 0.05 秒的时间内穿过这团气体。这些声波行进得不会比光快，实际上大概要慢得多，因此，这团气体云必然相当小，光在 0.05 秒内就能够穿过它——它的直径必定小于 15000 千米。（实际上，其直径大概远远小于这个数值，但是，只有知道声波在这个气体云中的传播速度，人们才能精确地确定它的大小。）假若这个气体云的直径大于 15000 千米，那么，这就会像谚语中的雷龙那样，雷龙需要经过几分钟之后才知道它的尾巴被踩住了。这样一个气体云是非常小的，它不可能是一颗像太阳那样的主序星的一部分，因为太阳的半径是 695 000 千米。这些 X 射线源是总体积很

小的星体——白矮星、中子星或黑洞——有关的。有1颗特殊的星已经作过非常彻底的分析，有明显的证据说明它可能是黑洞。这个天体就是天鹅座 X-1。

天鹅座 X-1——第一个黑洞的发现

虽然现在还不能完全肯定天鹅座 X-1 就是一个黑洞，但是有很好的证据表明它很可能是黑洞。下面所述的是宇宙中的一个侦探故事。天空已经给天文学家出了一个难题，到底把天鹅座 X-1 归入哪一类天体呢？人们最初在犹豫是否把它放在黑洞的位置上，这是因为求助于黑洞来解释任何不可思议的现象并不能证明黑洞确实存在。尽管仍然有些争论，但是，要把天鹅座 X-1 解释为其他任何天体而不是黑洞，却是相当困难的。

这段史话开始于1965年，那时在一次火箭飞行期间，天鹅座 X-1 首先被发现了。正如它的名字表明的那样，它是第一批发现的 X 射线源中的一个。它的性质是不明确的，因为它不能被认证为任何具有显著特点的光学天体。它位于银河系之内，而这第一批 X 射线源的位置定得不精确。但在所拍摄的照片上有许多恒星，人们不可能检查所有这些恒星有无奇特的现象，尤其是那时人们并不准确地知道 X 射线源的光学对应体应该是什么样的特殊天体。甚至有可能像某些 X 射线源那样，它在光学上是完全不可见的。60 年代末，更多的观测资料积累起来了，这个源的 X

射线强度曾经发生变化，但它的性质仍然不明。

在 1971 年和 1972 年，研究取得了突破。1971 年 3 月和 4 月间，“乌呼鲁”卫星发现这个源的 X 射线辐射有明显的变化。低能 X 射线强度降低到以前数值的 $1/4$ ，而高能 X 射线的强度增加了。但是，最重要的是，在与 X 射线源同一个天区中突然观测到一个射电源。美国国家射电天文台的已用射电望远镜搜寻天鹅座 X-1 的射电对应体，但直到出现了这种变化才发现了这个射电对应体。

似乎已经相当清楚，上述的射电源和 X 射线源是同一个天体。发现这个射电源的重要性并不在于这种射电噪声提供了有关这个源的性质的许多信息，而在于射电定位的精度很高。与此同时，X 射线定位变得更精确了。在那个椭圆中的一颗亮星开始显得更加具有魅力，尤其是射电定位的中心正好落在那颗恒星的位置上。射电定位的不确定性大约与照相底片上那颗恒星的星像一样大小。

这样，人们就证实了天鹅座 X-1 与 1 颗恒星是同 1 个天体。在确定 X 射线源的性质时，它们的光学证认是关键的一步，因为分光方法可以告诉我们有关恒星的许多情况：它有多大，温度有多高，是否是一个双星等等。这颗恒星称为 HDE226868，就是在德雷伯光谱分类星表补编表中编号为 226868 的那颗恒星。光谱表明，它是 1 颗 B 型超巨星，1 颗很大的、温度很高的蓝色恒星。

1971 年日本的一个研究小组获得了进一步发现，他们发现，该源的 X 射线非常迅速地闪烁。我们可以回想一下，

这种闪烁是很重要的，因为它表明这个 X 射线源必定非常致密。天鹅座 X-1 开始显得愈来愈像一个黑洞了。

然后，光学天文学家们着手进行了研究。他们在这颗恒星的光谱中寻找反复不定的多普勒位移，这些位移表明，这颗大质量 B 型超巨星 HDE226868 被一颗看不见的伴星的引力吸引着来回运动。测定多普勒位移的振幅是一个关键，同时，测定可见星的性质也是必要的。在 1972 年观测季节期间（只有当恒星处于夜晚的天空中时，光学天文学家才能够观测它们，而天鹅座 X-1 只是在春季和夏季时才能位于夜晚的天空中），人们深入细致地研究了天鹅座 X-1。根据这些观测，人们提出了一个相当好的模型，几个研究者都同意这个模型。虽然每个人采用了略微不同的数据，但是基本模型是一样的。

这个恒星系统是一个双星系统，包含一颗 B 型超巨星和一个黑洞伴星。在超巨星的外层，很高的温度产生了恒星风，物质通过恒星风从超巨星流出。假使超巨星在太空中是孤零零的，那么恒星风只是吹入星际空间，成为存在于恒星之间极其稀薄的气体的一部份。可是，邻近的伴星吞噬着从超巨星流出的一部分气体。气体绕着伴星作螺旋式的转动，在伴星周围形成一个气体圆盘。这个吸积盘内的气体向着黑洞旋转落下，在被黑洞吞没之前，气体被压缩，发射 X 射线。现在人们最倾向于用黑洞来解释这个恒星系统，在作出这个论断的逻辑链条中，X 射线是关键的一环之一。

这股气流也以其他一些方式显示出来。这股气流的部分产生氢和氦的一些特有的发射线，由于这些光谱线的多普勒位移表明，产生它们的气体并不随同两个星体运动，因此可以肯定，这些发射线并不来自这颗 B 型超巨星。

上面描述的天鹅座 X-1 的模型适于解释所有的观测现象。但是天文学家一定会提出疑问：是否有任何别的可以相信的模型能解释所有观测事实呢？这里最重要的观测事实是存在着 X 射线，因为包含着一颗中子星或者黑洞的恒星系统是恒星能够产生大量 X 射线的唯一合理的方式。究竟是哪一种呢？是中子星还是黑洞？我们已经设法找到了一个 X 射线源，但是，我们已经真正地找到了一个黑洞吗？我们记得，中子星最多只能有 3 个太阳的质量。为了解决这个问题，人们必须确定伴星的质量。以前描述过的双星方法可用于回答这个问题。

在 1972 年底，一般的舆论认为，伴星质量非常大，因而它一定是黑洞。蓝超巨星通常是大质量恒星，因为人们认为，质量不太大的恒星是比较冷的，而且至少按标准的恒星演化来说，它们决不会经过蓝超巨星阶段。像这颗可见星 HDE226868 那样的 B 型超巨星，典型的质量约为太阳的 30 倍。主星具有这么大的质量，表明伴星的质量至少为太阳质量的 5 倍，也可能为 8 倍。中子星肯定不能含有比 3 个太阳质量还要多的物质，而且很可能中子星的质量比这个数值还要小很多，所以这颗伴星就是一个黑洞。

天鹅座 X-1 的黑洞模型是一个很有说服力的模型。

1973年年中，时机多少有些成熟了，可以跳出科学杂志的圈子向世界公布已发现了一个黑洞的新闻，天文学家手中有足够的证据，表明这个结论不仅仅是猜测而已。

但是，完成了对天鹅座 X-1 分析的最初阶段，是否意味着我们可以躺在“已发现了一个黑洞”上，而中止对天鹅座 X-1 的研究，转向研究其他问题呢？科学工作是不能这样的。至今描绘的天鹅座 X-1 的模型并非完美无缺。虽然理论解释同所有的观测事实相符合，但理论解释是很笼统的，一些细节问题仍需进行研究。观测资料需要加以核实。对这个恒星系统的分析在继续着。

天鹅座 X-1 系统如何变到现在的状态呢？天文学家几乎永远不可能亲眼目睹恒星的演化，所以他们需要运用推理的手段。恒星演化的过程是否有理由产生一个像天鹅座 X-1 那样的系统？天鹅座 X-1 和其他类似系统的发现重新激发了人们对双星晚期演化的理论计算的兴趣。

现在，这个系统中有两颗恒星，一个 25 倍太阳质量的天体，我们可以看见；另一个天体是黑洞，质量小一些，我们估计为 8 个太阳质量。在开始阶段，现在是黑洞的那颗星拥有系统的大部份质量，它变成一颗红巨星。如同红巨星通常演变的情况，它的包层膨胀，最终包层变得非常大，以至系统中的伴星，就是我们现在看见的那颗，开始俘获系统的部分物质。气流从那肿胀而又畸形的红巨星流向伴星。最后，全部包层都倾泻到伴星上，而系统中这颗红巨星的核心坍缩成现在的黑洞。此后，伴星开始将物质倾泻

到黑洞，产生了一个吸积盘以及我们现在观测到的 X 射线。

描述上述图像的计算数据表明，像天鹅座 X-1 那样的系统不能持续很长的时间。大约 1 万年之后，由于 25 个太阳质量的那颗星变得太庞大，物质流动率将增加。气流的增加大概会阻塞住吸积盘发出的 X 射线。到那时会发生什么情况呢？这是大家都说不准的事。

这样，我们就能够了解天鹅座 X-1 是如何变成现在的状态的。现在这个阶段的短暂时间——1 万年（同通常恒星演化的时间几百万年和几十亿年相比是短暂的）解释了为什么我们看不到许多这类天体。当我们观测天空时，我们只能检查出几个正在通过这短暂演化阶段的恒星。大多数这种系统已经不是 X 射线源了，或者过去曾经是 X 射线源。

另一个活跃的研究领域是努力建立该系统的吸积盘模型，以便精确地了解 X 射线来自何处。理论家们在这里试图提出一种吸积盘模型，使得它产生的 X 射线谱同实际情况相似。虽然已经有了一些一般性的了解，但理论和观测结果在细节上的吻合仍有待于将来。例如，我们讨论这个系统发射 X 射线特性的变化。这个系统有时会发射射电波和少量的低能 X 射线。平时，在一次突然的变化以后，它没有射电波辐射，但发射较多的低能 X 射线。莱脱曼和厄尔特兰证明了吸积盘是不稳定的。吸积盘可以是厚的，也

尔特兰和夏皮罗证明，厚盘光谱大体上类似于观测到的 X 射线谱，但夏皮罗指出，不存在细节上的类似。

70 年代后期，在美国发射了称为“高能天文台”的新一代 X 射线望远镜。这些望远镜为 X 射线发射的时间变化提供了补充信息。X 射线在几毫秒内闪烁，强度有变化。这些变化大概是由吸积盘内的气团运动引起的。热斑——一个密度稍高的气团绕黑洞转几圈，此后它被黑洞吸引而离开吸积盘的内边缘，掉进这个“处理垃圾”的场所——黑洞中去。

假定热斑的辐射多少是成束的，朝向一个特定的方向。正如旋转的中子星每转一圈，脉冲星的辐射束绕天空扫过一周那样，热斑绕黑洞转一圈，这个辐射束绕天空扫过一周。X 射线天文台应观测到这个作螺旋轨道运动的热斑发射出一系列准周期性的 X 射线短促脉冲。观测家们主张，用“乌呼鲁”这一代的 X 射线卫星天文台去探测这些准周期性的脉冲，但没有一个主张是明确的。如果这些脉冲被观测到，对它们做分析也许会提供有关吸积盘结构的信息。

前几段简短地概括了关于黑洞和吸积盘新近研究的一个主要领域。这些研究课题是“开拓性”的理论天体物理学家的的工作，他们造成多数人的观点，认为天鹅座 X-1 系统在吸积盘中央有一个黑洞。黑洞是怎样形成的？吸积盘怎样产生 X 射线？吸积盘内的热斑可以观测到吗？为了取得进展，科学家们必须把他们的工作建立在某个范例的基础上，也就是建立在某个恒星系统的一个基本模型的基础

上。天鹅座 X-1 作为黑洞范例似乎是合理的。

然而，这种谨慎建立的观点并不是唯一可取的观点。爱挑剔的人从事着黑洞研究中的另一个新领域。这些人对天鹅座 X-1 系统中吸积盘的中央天体是黑洞的意见感到不快。纵然他们是错的，他们的研究也是有用的，因为这迫使开创性的理论家们去重新考察上面描述的天鹅座 X-1 的模型的根据。而且，如果这些批评家是对的，我们便失去黑洞的最佳候选者，从而回到了最初提出的问题：黑洞真的存在吗？

天鹅座 X-1 的非黑洞解释

爱挑剔的人已对天鹅座 X-1 确立的模型提出一些正在探索的问题。他们还没有策划一场“政变”来废黜黑洞模型并把它交给“监狱”——丧失声誉的科学理论在科学年刊上销声匿迹，并在那里告终。事实上，确立的模型现仍在大多数天文学家中盛行。但即使确立的模型最终成功了，爱挑剔的人提出的问题也加深了我们对于包含围绕黑洞的吸盘的双星系统的理解。

在天鹅座 X-1 系统中 X 射线必定来自吸积盘吗？黑洞周围的吸积盘是天鹅座 X-1 的黑洞模型的核心，因为它是 X 射线的源泉。为了避免天鹅座 X-1 中存在黑洞，早先有一种看法认为，该系统中的大质量伴星是一颗正常的大质量恒星，就像御夫座 ϵ 星的大质量伴星可能是一颗正常的

星一样。在这个模型中，两颗星被缠绕的磁场连结起来，而磁场将电子加速到很高的速度，产生了 X 射线。

用两颗相互作用轨道运动的恒星的磁场受到扭曲而发射 X 射线来作为天鹅座 X-1 的模型，存在两个主要问题。其一是所提出的伴星从未被观测到。我们后面将考虑其他可选择的模型。其中有一些也存在这个问题。第二个问题更为严重，这个模型没有指出怎样从观测上去验证它，既然没有人观测到在类似的距离上作轨道运动的两颗正常星产生 X 射线的任何别的双星系统，那么，这个模型怎样证实呢？实际上，人们并没有很认真地对待这个模型，因为吸积盘模型对 X 射线发射提供了更自然得多的解释。但是，谁知道呢？也许这个模型被否定得太容易了。

近来更受人注意的一个问题是：伴星的质量确实如观测所给出的那样大吗？天鹅座 X-1 双星系统离我们太远了，我们只能通过间接的证据求得该系统中两颗星的质量。从可见星观测到的多普勒位移表明了该星受到系统中另一个天体的吸引力有多大。假如可见星的质量小，那么一个小质量的不可见的天体可以拉住它绕转并且产生观测到的多普勒位移。

与黑洞模型相竞争的另一个重要模型是假定那颗可见的蓝星是一个小质量的特殊蓝星，它处于演化的一个不可思议的阶段。人们在别处已发现了一颗可能处于类似演化阶段的小质量蓝星，它在星表上的名字是 HZ(体马逊-茨威基) 22。

然而，为了同天鹅座 X-1 系统中的可见星一样亮，像 HZ22 那样的恒星必须离我们很近。1973 年，两个天文学家小组间接地测量了天鹅座 X-1 系统的距离，得出约 2500 秒差距（8000 光年）。在这样的距离上，带有一个小质量伴星的小质量蓝星是看不见的。这样，一个不包含黑洞的天鹅座 X-1 的特殊模型也就垮台了。1975 年底，从许多不同方面研究这个问题的几位研究者认为，天鹅座 X-1 伴星的质量介于 10 个太阳质量和 15 个太阳质量之间。

爱挑剔的人提出的下一个问题是：吸积盘是否一定在 10 至 15 个太阳质量的伴星周围，它能否位于系统中别的地方？两组独立的天文学家提出，吸积盘可能围绕着一颗中子星。那颗 10 至 15 个太阳质量的伴星可能是主序星，它引起可见星的多普勒位移，而质量较小的中子星引起 X 射线发射。

有两条理由使得这些模型有点难于相信。两组天文学家都假定了系统中有一颗 10 至 15 个太阳质量的大质量恒星。这样的星通常是很亮的，可是在系统中并没有看见另外的星。观测虽然不十分灵敏，但基本上已经足以使我们断言，该系统中的一颗 10 至 15 个太阳质量的恒星是应该被发现的。由于它没有被探测到，因此它并不存在。此外，当超巨星位于我们和大质量伴星之间时，我们观测到该系统的 X 射线发射稍微减小，X 射线被超巨星吸收，或者被从超巨星流向吸积盘的气流所吸收，这是导致 X 射线强度减小的一种很自然的方式。再说，一个由超巨星、大

质量主序星和中子星组成的三合星系统是如何演化而来的，令人有点费解。这种非黑洞的三合星模型虽然还未彻底否定，但已气息奄奄了。

以前在考虑什么类型的恒星会形成黑洞时，已提出了有关黑洞模型的另一个问题：“在吸积盘中央的一个 10 至 15 倍太阳质量的天体一定是黑洞吗？它难道不是质量很大的中子星吗？”根据物质在高密度状态下特性的传统概念和爱因斯坦的广义相对论，这样一个 10 至 15 倍太阳质量的天体是不可能存在的。欲使中子星体重过分增加（或“肥胖”），具有天鹅座 X-1 那样的质量，就必须放弃广义相对论。

天鹅座 X-1 是黑洞更可信

故事并未结束，为天鹅座 X-1 所建立的黑洞模型可能会遇到更多的挑战。但是，这个已确立的模型至今已经受住了时间的考验。虽然人们曾经提出过一些尖锐的问题和其他一些非黑洞模型，但是许多问题已经得到答复。如果不想求助于一些极为复杂的模型，天鹅座 X-1 中存在一个黑洞则是不可避免的。天鹅座 X-1 可能是一个黑洞，但天文学家和物理学家都还没有证明它一定是一个黑洞。回顾一下在这个稍许复杂一些的逻辑链条上的各个环节是值得的：

1. 我们看见的蓝色超巨星 HDE226868 是包含着天鹅

座 X-1 这个 X 射线源的一个恒星系统的成员。

2. 对这个单线分光双星的光谱多普勒位移的分析表明，系统中有一个伴星，其质量为 10 至 15 个太阳质量。

3. X 射线来自一个致密星体(中子星或黑洞)周围的吸积盘。

4. 大质量伴星位于吸积盘的中心，这个大质量伴星是致密星体。

5. 一个质量为 10 至 15 倍太阳质量的致密星体是一个黑洞。

如果要证明天鹅座 X-1 是一个包含黑洞的恒星系统，那么，在这个推理的链条上的每一个环节都必须是可靠的。至今，这些环节都已经检验过，可以说是真实的。质疑是科学过程的一个重要部分。往后，读者将看到对于各种天文现象的各种模型提出的类似的问题。直到现在为止天鹅座 X-1 的黑洞模型已经经受住由爱挑剔的人构造出的一些非黑洞模型的考验。黑洞模型是解释观测资料的最简单的方式。因此，天鹅座 X-1 大概是一个包含黑洞的双星系统。

其他的黑洞候选者

接连不断地怀疑天鹅座 X-1 是否确实是一个黑洞，反映了人们内在的踌躇，这起因于黑洞真正存在的结论过分依赖于一个特殊的天体。天鹅座 X-1 可能是一个奇特的系统，大自然可能在戏弄我们。天鹅座 X-1 可能是伪装成黑

洞的别的什么东西。但是，同样的特殊伪装，同样的大自然戏弄，不大可能在两个不同的恒星系统中同样起着作用。一个系统，一个天体，最后总可以被认为是“特殊的”，但几个具有同样行为的天体就不能如此容易地被搪塞过去了。一些复杂的模型也许能使天鹅座 X-1 系统内存在一个黑洞的必要得以免除，然而，它们多半不可能应用于几个发射 X 射线的双星。至今，讨论集中在天鹅座 X-1，因为它是被研究得最好的大质量 X 射线双星。还存在着另外一些恒星系统，其中致密天体的质量足够大，使它可能是黑洞，但质量又不是大到使它一定是黑洞。特别是，圆规座 X-1 和天蝎座 V861 这两颗星是现时除天鹅座 X-1 之外的最好的黑洞候选者。

圆规座 X-1 是一个引起人们兴趣的 X 射线源，但现时它不是最好的黑洞候选者。它位于一个双星系统内，因为 X 射线在 16 天的间隔内消失，这意味着从我们来看轨道运动正好把 X 射线源带到另一颗星的背后。可是，很长一段时期内这个系统一直未能从光学上得以证认。直到 1976 年后期，一个天文学家小组才把圆规座 X-1 证认为一颗非常红、非常暗弱的恒星。星光穿过一片片的星际尘埃云，大部分蓝光被吸收了，所以看起来是红的。甚至在光力最强的望远镜用蓝光拍摄的底片上，它也只是勉强可见。然而，它的 X 射线强度迅速地涨落，其方式和天鹅座 X-1 的 X 射线强度在几毫秒的时间尺度上的闪烁相同，这引起了人们的兴趣。由于光学星很暗弱，现在还不知道它是否是单线

分光双星，或者，我们看见的这颗星是否拥有可能为黑洞的不可见伴星。圆规座 X-1 之所以作为黑洞候选者是因为它被证认为双星以及 X 射线源的闪烁性质。

1978 年夏季，一个天文学家小组用哥白尼卫星发现了另一个大概更有希望的黑洞候选者。这颗星以前已被证认为一颗单线分光双星。70 年代初沃尔克完成了它的轨道分析，结果表明不可见伴星的质量介于 7 个太阳质量和 11 个太阳质量之间，作为中子星，质量是太大了。波立登、波拉特、桑福德和洛基利用哥白尼卫星研究双星系统内的质量转移。1978 年 4 月，他们用该卫星上的紫外和 X 射线望远镜观测了天蝎座 V861，发现这颗星也是一个 X 射线源，而且在每一个轨道周期内当超巨星或气流挡住了射向我们的 X 射线时，X 射线源就发生一次掩食。

于是，天蝎座 V861 似乎是类似于天鹅座 X-1 的天体。黑洞的所有要素都存在：一颗大质量的不可见伴星，可能来自吸积盘的 X 射线，以及一颗给吸积盘提供物质的可见星。至今对该星的观测资料不如天鹅座 X-1 那样丰富。然而，关于这个双星系统我们所知道的情况无疑地表明天蝎座 V861 中很有希望存在一个黑洞。

特小黑洞与特大黑洞

爆炸中的特小黑洞

原则上说来，任何数量的物质都可以形成黑洞，假如这些物质能压缩到它的史瓦西半径之内。设想一个黑洞是由一个质量比太阳大 1 亿倍的天体的坍缩物形成的，在那种情况下，黑洞的半径是 3 亿千米，即地球轨道半径的 2 倍，而坍缩物在它越过史瓦西半径时的密度只有 1 克/厘米³，不比水大。这样，如果质量足够大，那么当这些物质仍然处于普通密度下，它们也能形成黑洞！当然在持续的坍缩中，几分钟之内密度也能达到无限大。

让我们想象一下，1000 亿倍的太阳系物质——即我们的银河系的质量，把它当作进一步的例子。在这种情况下，史瓦西半径将是 3000 亿千米，或 1 光年的 1/30 左右，既然我们的银河系的半径大约为 5 万光年，那么只要把它压缩到原来的百万分之一即可形成黑洞。如果能发生这种情况，那么银河系中的恒星也不会碰撞，它们互相之间还是离得很远。

有必要考虑一下，如果我们的银河系不在旋转，它或

许早就变成一个黑洞了。正因为它在旋转，我们才由于银河系中各星的运动平衡了被吸向银河系中心的引力而得救。但是不能排除这种可能性：由整个星系形成的大质量黑洞可能在宇宙中某处存在。

与大质量黑洞进一步有关的一点是落进里面去的物体所受到的潮汐作用。比太阳质量大几倍的黑洞，它的潮汐力将会使一个宇宙航员在到达视界之前被毁掉。但在史瓦西半径处的潮汐力随黑洞的质量的增加而减小，如果一个黑洞由整个星系构成，那么一个掉进黑洞的宇宙航员在飞越视界时就感觉不到潮汐力的作用了。但即使这样，他也只能生存几星期，之后将不可避免地落到黑洞中心被完全摧毁。他永远不可能把他在“黑洞中的生活”告诉外面宇宙中的任何人。

在尺度的另一端，剑桥大学斯蒂芬·霍金也猜测到在一定的条件下也会产生小质量的小黑洞的可能性（他想到尤其在宇宙形成的初期所面临的情况）。视界处的密度和潮汐力都随较小的质量而增加。例如我们早已知道地球的史瓦西半径大约是1厘米。如果把地球压缩到这个大小，那么地球的密度将是太阳处在史瓦西半径时的密度的1000亿倍。

还存在着质量可与那些小行星相比的小黑洞的可能性。这已引起得克萨斯大学杰克逊和瑞安的关注，在1973年9月出版的《自然》中，他们发表了一篇出色的论文，试图对1908年的“通古斯事件”作出解释。

1908年6月，在西伯利亚通古斯出现了一次大爆炸，击倒了周围几百里的树木。目击者说当时天空出现了一条蓝色斑纹，在很远的地方就能听到爆炸声。释放的能量可能相当于2000万吨级氢弹爆炸所放出的能量。它常被看成为巨大陨星的碰撞，但是却从来没有找到过这类陨星落下时预料的碎片和所形成的坑。另外一些人断定这是个彗星的核，比陨星更容易散开，大部分由冰构成，不能形成坑。这次事件的神秘本质没有惊人地引起更离奇的解释：例如它是由一艘外界空间飞船的马达失灵而遭毁灭所造成的！

杰克逊和瑞安提出的戏剧性意见是：这次爆炸是由一个小黑洞和一个大的小行星相撞引起的。如果存在着这类天体，那么它必然是很小的，半径不到百万分之一厘米。但它的引力场是非常强的。接着，他们假设这个天体以大于地球逃逸速度的速度接近地球，质量大而体积小，笔直地越过我们的行星，以不小于碰撞前的速度又一次消失在宇宙中。他们的推算指出：这类小黑洞在穿过大气时引起了一个密度很高的冲击波，产生观测到的紫外辐射，在地球上引起了巨大的爆炸。他们继续指出这个天体将在北大西洋上纬度约 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 以北，经度约 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 以西再现。在这一点上将出现一次水下冲击波，在表面引起扰动和另一次空气冲击波。他们并且建议对当时的航海日记作彻底的检查，以寻找是否有这类记载。

这篇文章引起了强烈的反响，也有人持怀疑态度。虽

然其解释不能使人满意，但它至少具有能解释人们看到的现象这样一个优点。与此相反，我们必须说明除非银河系中的小黑洞是非常普遍的，否则地球与之相撞的机会是微乎其微的。其实黑洞是由恒星坍缩形成的理论越令人信服，小黑洞可能的起源也越使人怀疑。

然而，小黑洞的概念颇吸引人。设想一下如果这类天体确实与“通古斯”事件有关，如果它的速度小于地球的逃逸速度时，那么，会发生什么情况？答案是：“发生灾祸！”它会像原来那样穿进地球，然后留在我们的行星中来回振荡，一边运行一边吞并地球，而不再回到宇宙中去。最后它在地球中心停下来，以它巨大的潮汐力继续摧毁周围的物质并且吞并进去。因为黑洞的体积太小，所以要吞下整个地球需要很长时间。但随着它的体积的增大，这个过程将会加快。一旦黑洞留在地球上，那么我们的行星就必然要惨遭灭亡！

70年代中期以前，所有有关黑洞的研究都只是纯粹地利用爱因斯坦引力论的未修改形式。奇点被看作是一个点状体，不过即使它是一个密度非常大的弹丸一样的极其微小的物质球，黑洞的经典性质也没有什么不同。人们的注意力集中于研究黑洞的大尺度性质，没有考虑转到研究物质小尺度性质产生的图像（主要是因为无人知道应该如何去分析这个问题）。

然而物质并非由极其微小的弹丸状粒子组成。在原子级别上，构成物质的电子、质子和中子并不是一些极微小

的刚性弹丸。更正确地应该把原子中的电子想象成为电荷云。

在 20 年代，物理学家试图了解原子的性质，提出了量子理论来解释微观尺度上的物质特性。例如人们不可能精确地确定一个基本粒子——电子的位置，不能说出现的这个电子在原子核的哪一边，在以后的某一瞬间它又在原子核的另一边。人们可以说的一切只是在一个时间范围内，电子出现于一个特定位置处有一个确定的概率。人们不必懂得量子理论的所有细节就可以理解爆炸着的极小黑洞。关键在于不确定性的概念——人们不可能准确地确定一个非常小的粒子的位置，只能指出它处于一个特定位置上的概率。有兴趣钻研量子理论的读者应该读一本霍夫曼写的书《量子的奇怪故事》，它是一本非常迷人的书，其深浅程度与本书一样。

黑洞的蒸发

黑洞这一概念在原来的意义上是指任何东西都不能逃出的天体，甚至光也不例外。然而对黑洞的进一步研究表明，如果考虑到黑洞的量子效应，黑洞也会向外蒸发放出物质，这是很有意思的理论发现。

让我们来看看，如果将量子理论应用于黑洞，考察一下由英国物理学家霍金所发现的微小黑洞的蒸发，究竟会出现什么现象呢？有两条途径来想象这种蒸发发生的方式，

量子理论阐明，在很小的尺度上粒子都是模糊不清的，它们看起来像一些微小的云雾状东西。根据这个观点，黑洞中央的奇点不能看成是无限小的弹丸，必须看成是一个物质云。人们只能陈述在某一瞬间这个奇点位于何处的概率。

对于一个10倍太阳质量的黑洞，量子图像与经典图像之间的差别不太重要。模糊了的奇点位于视界内部的深处，因而它同经典黑洞理论中的点状奇点之间的区别似乎是无关紧要的。但是对于特小黑洞，模糊的奇点并不比黑洞本身小多少。

模糊的奇点位于黑洞中心附近的概率非常高。但是，还存在着很小但不为零的概率可以在远离黑洞中心的地方发现奇点中的某些物质。如果高速拍摄一系列黑洞的照片，那么在宇宙年龄的长时间内可能有一次会发现黑洞的物质远离其中心，甚至在黑洞视界之外，在这个时刻，它通过隧道效应穿出视界，也许会永远离开黑洞。

由于小黑洞的视界面更加靠近它的奇点，所以黑洞蒸发过程会加速进行。一旦特小黑洞丧失了一丁点物质，它就会变得更小，也就愈加容易失去更多的物质。这个过程要一直加速到它完全蒸发掉。

还可以从另一个角度来看待特小黑洞的蒸发或爆炸。虽然这种方式有点难于想象，但它却更加接近于现代物理学家对微观世界的设想。它把“模糊的奇点”这个有点含糊不清的概念用虚粒子云的观念去代替。任何产生强作用力的物体周围都环绕着虚粒子。这些虚粒子的产生与消失

是在非常短的时间内，除此之外，它们与真实粒子是完全一样的。物体之间的相互作用是由于伴随着它们的虚粒子云之间的相互作用。

宇宙中每一个粒子都可看作它所携带的一些“护卫”着它的虚粒子。一旦在观点上产生了这种飞跃，那么对于黑洞蒸发所发生的一切就不难想象了。另外，只有具有非常小视界面的特小黑洞才会在适当的时间内蒸发掉。特小黑洞奇点周围的一个虚粒子穿出视界外，沿着一条路径远远离开黑洞的几率是很小的。在虚粒子穿出视界的过程中，特小黑洞损失质量，蒸发过程加速进行。高能粒子和虚粒子都要设法跑到黑洞视界这个“掩护斗篷”之外，最终，特小黑洞就会消失在这些高能粒子和虚粒子云之中。

霍金的发现冲击着我们对现实世界的认识，如果没有这种观念上的转变，对理论物理学家来说，黑洞蒸发爆炸的概念就会成为天大的笑话。一个引起人们兴趣的理论研究领域在探讨是否可能通过某种观测来证实正在爆炸的特小黑洞的图像。此外，这种分析已经在我们心目中对于黑洞观念产生了根本的改变，它冲击着整个的几乎是形而上学的宇宙观。

特小黑洞在那里

哪几种黑洞可能蒸发呢？黑洞愈大蒸发得愈慢。宇宙已经存在 $100\sim 200$ 亿年，因而质量大于 10^{15} 克的黑洞都还

没有蒸发掉。这样，搜寻正在蒸发的黑洞必然限于这些特小黑洞。 10^{15} 克黑洞的视界半径为 10^{-23} 厘米——一个极其微小的距离。既然我们已经明确了现在可能蒸发的黑洞的类型，就让我们提两个与搜寻微小黑洞有关的问题：这些微小黑洞是怎样形成的？又如何来找到它们呢？

如果特小黑洞果真能够形成的话，它们应形成于爆炸宇宙的早期阶段。宇宙现有的一些 10^{15} 克的天体已经同引力处于平衡状态，这是因为它们非常坚硬，足以抗拒引力的压缩。现在组成宇宙的物质在大爆炸年代经历了膨胀与冷却。这种早期的膨胀究竟是均匀而平稳的呢？还是像山涧瀑布那样湍急，同时一些由热气体形成的微小凝聚体互相碰撞、散失，然后再碰撞呢？卡尔已经证明，除非宇宙膨胀得相当平稳，原始黑洞很可能会形成。实际上，处于高度湍动状态的早期宇宙是可能产生许多原始黑洞的。

那么，我们现在就来寻找这些原始黑洞。一个正在蒸发的黑洞，随着它减小到一无所有，要产生出一大批粒子，这些粒子都是通过隧道效应穿出黑洞视界的。一些计算表明，这些粒子中许多都是 γ 射线，因而观测者试图搜索天空以发现宇宙中的 γ 射线爆发。人们可能认为前面论述过的 γ 射线爆发或许正巧就是要搜寻的 γ 射线。但是，已经观测到的一些 γ 射线爆发既不够迅速，能量也不够高。对于爆炸黑洞产生的能量更高的快速 γ 射线爆发的搜寻工作并未获得成功，这个限制表明，每 1 立方秒差距内特小黑洞的数目必定少于几千个。在某些情况下，这个上限或许

会更进一步减小。

为了寻找特小黑洞，另一种更带推测性的尝试是由两位理论天体物理学家提出的。他们假定，1908年一个特小黑洞曾经同地球相撞。那1年6月，由于某个来自太空的物体的撞击，使得西伯利来叶尼塞河河谷变成荒芜。几百头驯鹿死亡（但是该地区为无人区），烧焦了周围几英里（1英里=1609.344米）的森林。

各种各样的人已经提出了一些可能的客体来作为引起这次爆炸的根源。所提出的理论从很普通的一直到稀奇古怪的都有，而普通的理论可能是正确的。很可能是一个直径为几百米的冰块所构成的小彗星在1908年同地球相撞。这个模型解释了所发生的事情：小彗星在大气层中要蒸发而不留下痕迹；它造成的损害大部分来自太空；它在大气中会遗留下一些尘埃。这些结论都同观察到的情形一样。但是，彗星模型的成功也未能阻止其他的一些推测。

1972年，得克萨斯大学相对论中心的两位理论家推测，一个特小黑洞曾经同地球相撞，它像一把热的刀切割软的奶油一样穿过地球，然后从地球的另一面出来（在另一边的大西洋，既无树林，又无驯鹿，也无将这场毁坏事件记录下来的其他物体，因而这种推测很容易）。然而，这种微小物体的离去会产生大气冲击波，这未被发现。再有，它通过地球会引起地震，也没有观测到。但是，反对用黑洞解释通古斯事件的最强烈的理由是在于它太离奇了。没有必要去乞求于黑洞来解释所发生的事件（此外，也没有

必要求助于反物质或者外来的宇宙飞船作解释)。

概括地说：没有观测证据表明特小黑洞的存在。搜寻来自爆炸的特小黑洞的 γ 射线爆发未获成功。甚至连有关特小黑洞同地球之间碰撞的更加奇特的说法也经不起科学详细研究的考验。这些天体的数量甚少，以致我们可以排除掉那种认为宇宙膨胀的早期阶段是极其紊乱的某些大爆炸模型。但是应当记住，这些特小黑洞并非一定存在，因为有一些大爆炸模型中是不会形成特小黑洞的。

超大质量黑洞

正如大多数富星系团的情形一样，室女座星系团的中央区被一个巨大的椭圆星系系统治着，它被称为 M87。

M87 具有一些令人感兴趣的特征。它是一个强射电源。在它的中心有一个强 X 射线源。且它具有一个明显的恒星般的核。更令人感兴趣的是从这个恒星般的核汹涌而来的一股大且明亮的“喷流”。这股喷流最容易在短时间曝光的照片上看到，这幅图清晰地揭示了这个星系的恒星状的核。整个情况使人想起与类星体 3C273 联结在一起的喷流。

1977 年间，有两组天文学家完成了对 M87 一系列的详尽观测。一组仔细测量了星系各部分的亮度。为解释他们所得的资料，天文学家得出在这个星系的中心必定有一个强大的致密的引力源的结论。他们论证这个尚看不见的

极其强大的引力源引起恒星围绕着星系中心拥挤在一起。这种恒星的拥挤现象便是一个恒星般的星系核的成因。按照天文学家计算，这个看不见的引力源的质量必定有 50 亿个太阳质量。

第二组天文学家把他们的注意力集中在分光观测上。他们仔细考察了星系各部分的谱线形状。当他们向星系中心观察时，他们发现谱线不同寻常地宽。这意味着靠近星系核的恒星正以不同寻常的高速运动着。为试图解释他们所得的资料，第二组天文学家也得出在星系中心必定有一个强大的致密的引力源。所有运动缓慢的恒星在很久以前便被这个看不见的天体吞噬掉了。仅仅那些绕这个强引力源高速运动的恒星才得以幸存。计算再次表明这个看不见的引力源的质量必定有 50 亿个太阳质量。

这显然暗示在 M87 的核心有一个超大质量黑洞。然而，这并不是天文学家第一次预测存在质量极其大的黑洞的可能性。许多年来，天文学家认识到超大质量黑洞对解释类星体和爆发星系有它的许多诱人的特色。首先，即使是超大质量黑洞也是很小的。其次，巨额能量必定束缚在黑洞的广阔引力场里。对解释类星体而言，小体积加上高能容量便满足一切要求。但是这些能量怎么能释放出来？哪种机制可以显著地开发黑洞的充足的引力能？

不幸的是，我们离最终的答案还很远。然而，康纳尔大学洛夫莱斯和剑桥大学布兰福德的工作结果表明，最近有一些重要的且有希望的理论突破。他们的意念牵涉到围

绕超大质量黑洞的气体盘（十分类似于天鹅座 X-1 系统里的圆盘）加上星系的磁场。

想象有一个超大质量黑洞，如可能是存在于活动星系或类星体中心的超大质量黑洞。由于黑洞自转，这些落向黑洞的物质偏爱地局限在黑洞的赤道面上（也就是说，垂直于黑洞的自转轴）。其结果是形成一个巨大的盘，就像围绕天鹅座 X-1 黑洞里的盘的巨大翻版。

一切星系都有磁场。这些贯穿空间的磁场是极微弱的，因为它们经过上百万立方光年扩散变稀薄了。可是旋进一个超大质量黑洞的气体当然携带星系磁场的一部分。长久之后，盘中磁场会变得极其致密。

电和磁现象是密切相关的。因此，当在圆盘内缘的致密磁场围着黑洞缠绕时，产生了一个强电场。这种电场的产生方式非常像地球上发电站里一座发电机的涡状电枢产生电流的方式。所以地面发电机在宇宙间的类同物被恰当地称为黑洞发电机。

这种相对论性发电机用巨大电场围绕着黑洞。在宇宙间没有别的什么地方能看到这般巨大量级和强度的电场。计算表明这种电场包含如此之多的能量，按照 $E=mc^2$ 公式，这种能量转换成大量的物质和反物质。不断涌现的电子和反电子从黑洞的电化环境向外吐出。虽然许多细节仍有待于解决，但这点似乎是清楚的，即粒子和能量的这种向外流出可以解释类星体的光亮和爆发星系核心的激烈活动。

自从本世纪 60 年代早期发现类星体和活动星系以来，它们曾迷惑了天文学家。最终，谜开始被协同一致的理论 and 观测研究解开了。两条研究途径都强烈地指向同一个令人注目的可能性：超大质量黑洞提供了类星体和爆发星系所需求的巨大能量。当然，这将是具有讽刺意味和有点自相矛盾的，即宇宙间最明亮的天体却由没有任何东西可从中逃逸的巨大黑洞提供能量。

黑洞和宇宙学

现代另一个纯理论研究领域是讨论黑洞对于整个宇宙演化的意义。在这个领域中，理论家也在进行一些推测性的研究，这些推测无疑地很难用实验检验，或许不可能用实验去验证。虽然如此，从理论角度来看这些推测，它们有助于人们对爱因斯坦引力理论的意义产生更深入地理解。视界和视界内奇点的特殊性质的研究，集中在关于宇宙演化的单向性以及时间箭头的方向等几个问题上。

视界的特殊性质来源于它的单向特征。物体可以进入黑洞，不会再冒出来。很长的时间内，这个单向性似乎同能量耗散方向的普遍趋势相矛盾，后者是在其他所有的宇宙过程中都已注意到的现象。太阳光，这种曾经聚集在太阳核心的氢原子核中的能量被释放出来，然后再耗散在星际空间。把这本书摔在地板上，原先聚集在你肌肉中的能量终止在地板的分子混乱而无规的运动中以及逐渐消失的

声波中。(这两个现象都是关于热力学第二定律应用的例子。)但是,一旦某个天体形成了黑洞,能量就集中在奇点之中,大质量恒星中数量极其巨大的分子的无规运动统统都隐藏在视界之下,终止在奇点内。

奇点本身带来某些潜在的问题。掉进黑洞的所有物质都终止在那里。根据经典理论,奇点的体积为零,密度为无限大。非常靠近奇点运动的物体要受到一些不可预测的力的作用。如果一个理论不能预测某种事情,通常这就意味着理论必须修改。确实,正是用了经典的广义相对论,在奇点附近它失效了。

霍金证明了黑洞最终会蒸发,他的研究提供了某条出路,使有关视界和奇点的理论从窘境中摆脱出来。掉进黑洞的能量最终要耗散到宇宙中,这可能需要一些时间,像天鹅座 X-1 那样的 10 倍太阳质量的黑洞需要 10^{66} 年。奇点不再是体积为零的一个几何点,它具有有限的大小,至少它对应的虚粒子云具有有限的大小。量子理论的概率性质代替了无限大的不可预测的力的荒谬性,这种力是对非常靠近奇点的物体起作用的。一个掉进黑洞的假想的宇航员永远从视线中消失,在奇点附近遭受未知的和不可知的力作用的困境可以解脱一点了,这个机智的驾驶员将来会作为 γ 射线云冒出来纠缠我们。在奇点附近发生了什么情况呢?由于量子理论决不会产生确定性的预测,爱因斯坦从来没有完全接受量子理论,他将他的想法表述为“上帝不会玩掷骰子的游戏”。但是这里,霍金则表述为“上帝不仅

会玩掷骰子的游戏，而且有时还把骰子扔到看不见的地方去”。

奇点可能避免吗？那时候同霍金合作的英国数学家彭罗斯已经提出了这个问题。那一个定理作了大部分回答，这个定理是他俩在共同写的一篇论文中证明的，后来称为彭罗斯-霍金定理。对宇宙的一些整体性质作了一些技术性的、明显合理的假定以后，定理阐明了，凡是终止在视界内的任何物体都必定要成为位于视界内的奇点的一部分。只要爱因斯坦引力论成立，粒子的轨道一旦进入视界以内，它们就必定终止于奇点。

终 极 黑 洞

众多的星系团寂静地、毫不费劲地在空间滑翔，彼此飘离得越来越远。并不存在什么力去推动这些庞然大物漫无目的地、徒然地潜向宇宙的无边无际的深处。它们的一切原动力都是在宇宙本身创生期间一次难以置信的爆炸所赋予的。

我们居住在一个膨胀的宇宙中。彼此相隔遥远的星系团之间的距离在不断增加。这些星系团分离的速率是同它们之间的距离成正比的，这便是“膨胀”的含意。它是哈勃定律最简单和最直截了当的解释。

可是这种宇宙膨胀必定会慢下来。所有这些散布在空间的星系以引力互相作用。所有星系之间的相互引力必然

会使宇宙膨胀的疯狂步伐减慢。

宇宙的膨胀究竟会停止吗？或减速率是否太小了，不足以有效地阻止宇宙不停地向着无限远的空间急速地猛冲？为了回答这些问题，为了发现宇宙的最终命运，我们首先必须建立宇宙的理论模型。因为引力影响宇宙演化，所以我们确信在我们的计算中一定要应用最好的引力理论。因此，我们的模型将建立在广义相对论的基础上。而且，我们最后还必须考察最遥远星系的运动。我们必须试图精确测量宇宙膨胀的减速率。把这个减速率与我们的某一个相对论模型相匹配。我们能够计算出宇宙的密度。以这种方式，星星揭示了我们非常遥远的将来。

按照广义相对论的观点，你不必谈论“引力”。换一种说法，爱因斯坦理论解释引力使时空弯曲，引力越强，时空的曲率也越大。诸如行星之类的天体和光线只不过是沿着弯曲时空里的最短程线运动。这便是广义相对论的真正含义：物质告诉我们时空是怎样弯曲的，而弯曲时空则告诉我们物质又具有怎样的表现。

宇宙里有许多物质。显然，所有这些物质必定会对时空的几何特性产生影响。由于宇宙里所有这些物质的存在，宇宙作为整体必定有形状。而且，这种几何特性必定会影响宇宙间物质的动态。因此，宇宙的形状必定同宇宙的最终命运有着紧密的联系。一个永远膨胀的宇宙与一个膨胀最终会停止并随后开始收缩的宇宙，所具有的形状必定很不相同。可是宇宙的“形状”的真正含义又是什么呢？

设想你向空间发射两束强烈的激光。再设想你使这两束激光在发出时是完全平行的。最后，假定没有任何东西阻挡这两束激光的传播，因而我们可以跟随它们在宇宙里穿越几十亿光年，去检测我们希望知道的所穿越的空间的曲率。

只有 3 种可能性。首先，我们可能发现这两束激光即使传播了几十亿光年之后仍然保持完全平行。在这种情形里，空间没有弯曲。宇宙具有的曲率为零，空间是平坦的。

另一种情形是，我们可能发现这两束光逐渐收敛。两束光在穿越宇宙的过程中彼此越来越靠拢。事实上，这两束光可能会在离地球十分远处最终相交。在这种情形里，空间不是平坦的。正像地球的经线在两极相交一样，宇宙的几何特征必定与球的几何特征相像。所以我们说宇宙具有正曲率，空间是球形的。

第三种，也是最后一种可能性，便是两束平行光最终发散了。两束光在宇宙里传播的过程中逐渐分离得越来越远。在这种情形里，宇宙必定也是弯曲的。但是它的弯曲的方向一定有大量的物质散布在空间。一切物质均有引力，且所有的引力都使时空的几何形状弯曲。因而恒星和星系的物质应赋予宇宙一个总的形状。然而，这个形状偏离完全平坦是极其微小的。定是与球形的情況正好相反。所以我们说宇宙具有负曲率。就像球面是正曲率曲面一样，马鞍形则是负曲率曲面的一个范例。正像画在球面上的平行线总是收敛一样，画在马鞍面上的平行线则总是发散的。数

学家称马鞍形曲面是“双曲线”的。这样，在负曲率宇宙里，我们说空间是双曲形的。

这3种情形的每一种对应于宇宙的每一种不同的动态和不同的最终归宿。为了理解这些不同的选择，设想把一块石头抛向空中。石头的下落也有3种可能性。首先，石头可能只不过是直上直下。在这种情形里，石头的速度小于从地球逃逸的速度。

换一种情况，你或许可借助于火箭，用大得多的速度向上抛掷石头。如果石头的速度等于从地球逃逸的速度，那么石头永远不再落下。

第三种可能性是，给予石头大于从地球逃逸的速度。在此种情形里，石头毫无困难地摆脱地球的引力，甚至在运行了很远距离之后，我们发现石头仍以相当大的速度离开地球继续它的旅程。

用石头作的类比，我们就可把宇宙的前途这个问题改变为：“星系团之间逃离的速度是否大到足以克服它们之间的相互引力作用呢？”

建立在爱因斯坦广义相对论基础之上的宇宙学模型是前苏联数学家弗里德曼 (A. Friedmann) 在1922年首先提出的。弗里德曼发现，如果在宇宙中拥有足够的物质去阻止膨胀，那么便有足够的引力促使空间向自身弯曲得像个球。这样，在一个正曲率的宇宙里，膨胀最终会停止，而收缩会开始。一个球形空间里，星系的速度小于它们之间的逃逸速度。

如果星系奔离的速度恰好等于它们之间的逃逸速度，那么宇宙将永远不会坍缩回原来的样子了。当然，宇宙的膨胀最终会缓慢得像蜗牛爬行似的。但是引力还没有强大得使星系在它们的行程上完全停下来。因此，按照弗里德曼的模型，引力不足以使空间向它的自身弯折。所以这个宇宙的曲率为零。在一个平坦的宇宙里，星系刚好能克服它们之间的引力。

最后，星系团之间的引力或许是非常之弱，以致宇宙将会继续使劲地膨胀直至无限遥远的将来。根据广义相对论，这种宇宙的形状必定是双曲形的。在双曲形空间里，星系团将永远地奔离。

在讨论宇宙的形状和命运时，我们所涉及的是宇宙在非常大尺度上的性质。当我们观测的距离非常大时，单个的星系便在观测视场的背景上消逝了。就像观看你的手掌时的情况一样。你知道你自己实际上是由无数的微小原子所组成。每个原子则由一个密集的核和在外围真空中绕核旋转的电子组成。但当你用手指触摸皮肤时，所有这些细节都感觉不到了。同样地，在我们所考察的巨大尺度上，宇宙也是非常平滑和毫无特色的。在弗里德曼模型的尺度上，宇宙是均匀和各向同性的。

由于宇宙在最大尺度上的均匀性，我们才能明智地谈论宇宙的平均密度。我们可以当作物质是均匀地分布在空间里的，因为这个星系或那个星系的个别细节完全可以忽视。这样做的好处在于，平均密度可把空间里的物质总量

与使空间弯曲的引力联系起来。但是我们刚知道宇宙的形状与宇宙的命运是怎样紧密地连结在一起。因此，宇宙的平均密度的测定应使我们能够预测宇宙的最终的命运。

平坦（零曲率）宇宙模型是球形（正曲率）宇宙和双曲形（负曲率）宇宙之间的分界线。因此，与平坦宇宙相关连的平均密度是区分上述 3 种情况的一个关键量。于是平坦宇宙的平均密度被称为临界密度。

临界密度就是当我们的宇宙如果真是平坦时它应有的平均密度。宇宙具有这种密度时，星系团刚好能够克服彼此间的引力。假如在空间里分布的物质比临界密度稍为多一点，那么引力将会大得足以在有朝一日停止宇宙的膨胀。假如分布在空间里的物质比临界密度稍为少一点，那么宇宙将会毫无困难地永远膨胀下去。

显然，临界密度必定与宇宙正在膨胀的速率直接相关。临界密度毕竟是决定宇宙能否永远地继续膨胀下去的一个量。我们简单地通过观测红移和遥远星系的距离来测定宇宙膨胀的速率。应用哈勃定律的同样数据，求出与膨胀速率对应的临界密度为每 1000 立方分米空间 3 个氢原子（相当于每 100 亿亿千米³ 内有 6 千克物质）。

在下表中，综合了影响宇宙前途的各种量之间的关系。球形宇宙被称为“封闭”的，其意义类同于一个球面是自封闭的。原则上，如果你在球形空间里沿某个特定方向作长时期旅行，你最终将会回到你出发的地方，正像作环球航行的航海冒险家一样。这样的宇宙是有限的，它并不会

永远延伸出去。然而，它并没有边缘或界限，也没有一个中心。你毕竟可以绕地球永远旅行下去而永远不会达到“边界”或“中心”。同样的道理，宇航员可以在一个封闭的球形宇宙里永远旅行下去而永远不会达到什么“边界”或“中心”。

与球形宇宙的情形相反，平坦宇宙和双曲线宇宙两者都是无限的。它们在各个方向都是永远地广延开去，因而被称为“开放”的。事实上，我们可以说平坦宇宙是“刚刚够得上开放”的，因为这种情形是封闭的球形宇宙与敞开得很大的双曲线宇宙之间的分界线。当然，仅仅由于这些开放宇宙的无限延伸性，它们就没有任何边界或中心。因此，不管我们居住在哪一种宇宙里，询问“宇宙的边界之外是什么？”这个问题是毫无意义的。并且这些宇宙中没有一种是有任何边缘或界限的，因此询问“宇宙往哪里膨胀？”这个问题也是没有意思的。这一类问题从根本上说都是荒唐的。

表 2

空间几何形状	空间曲率	空间的平均密度	减速参数	宇宙类型	宇宙的最终前途
球形	正	大于临界密度	大于 $1/2$	封闭	最终坍缩
平坦	零	恰好等于临界密度	恰好等于 $1/2$	平坦	永远膨胀(勉强)
双曲线形	负	小于临界密度	0 和 $1/2$ 之间	开放	永远膨胀

为试图确定我们到底生活在哪种宇宙里，我们发现这些相对论性的弗里德曼宇宙模型实际上只依赖于两个重要

参数。首先，宇宙模型必定依赖于宇宙正在膨胀的速率。表示这种膨胀速率的参数称为哈勃常数，且通常以符号 H_0 表示。海耳天文台的桑德奇花费了许多年的时间仔细地测量遥远星系的红移和距离，竭尽全力去测定这个膨胀速率。他测得的哈勃常数值是每百万光年每秒 17 千米。这简单地意味着，当你注视天空时，你会发现，每隔百万光年，宇宙的膨胀是每秒 17 千米。例如，1 亿光年远的星系应以每秒 1700 千米的速度离我们而去。

第二个重要参数表示宇宙膨胀减慢的速率。这个数称为减速参数，且通常以符号 q_0 表示。对于一个完全空的开放得很大的双曲形宇宙，其减速参数等于零 ($q_0=0$)。这是一种极端的情况。很简单，在这种情况下里绝无物质或引力使膨胀慢下来。

对一个平坦宇宙，那里具有的物质正好够确保星系团之间能互相逃离。其减速参数等于 $1/2$ ($q_0=1/2$)。而对于一个封闭的球形宇宙，则其减速参数大于 $1/2$ 。减速参数越大，膨胀停止和坍缩开始得越早。

图 14 里以图解的形式表示了对应于不同的减速参数的情况下宇宙的历史。因为谈论宇宙的“大小”可能会引起混淆和含糊不清，所以我们改说宇宙的尺度。宇宙的尺度就是空间里任意一个很大的距离，例如，两个相隔遥远的星系团之间的距离。图 14 表明了，根据减速参数的大小，这个巨大的距离怎样地随时间而变化的。如果减速参数等于零，宇宙将永远膨胀下去而绝不会减低速度。在这种情

况，宇宙的年龄必定是 200 亿年。这个年龄便是假定膨胀速率在这些年来没有减慢，从时间上简单地回溯外推得到的。

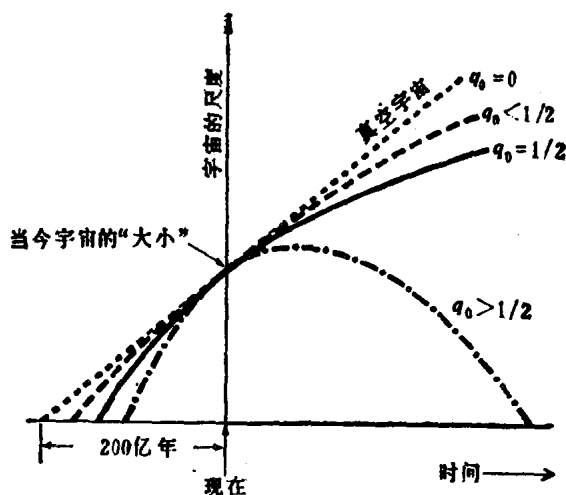


图 14 宇宙的历史

这幅图表明，对应于不同的减速参数 (q_0) 值，

宇宙的尺度怎样地随时间而变化

事实上，宇宙要比 200 亿年年轻些，因为宇宙不是空的。星系团之间的引力相互作用总会产生一些减速效应。因此减速参数必定大于零。而且，正如图 13 所示，大爆炸一定发生在比 200 亿年前稍晚的时候。例如，假定宇宙是平坦的 ($q_0 = 1/2$)，则宇宙的年龄应是 130 亿年。如果宇宙是

封闭的，则大爆炸发生在不到 130 亿年前。如果宇宙是开放的，它的年龄就在 130 亿年到 200 亿年之间。

有几种办法可估计减速参数或某个等价的量（如平均密度或曲率）的大小。不幸的是，没有一个方法是很可靠的，因而经常得到互相矛盾的结论。

其中一个方法牵涉到试图估计整个空间的平均密度。通过观测星系的运动，我们能推算出它们包含多少物质。然后我们计算，假如所有这些物质是均匀地分布在宇宙之中，那么平均密度应是多少。答案是平均密度比临界密度小得多。因此宇宙应是开放的和双曲形的，膨胀应永远继续下去。

第二种方法牵涉到试图猜测宇宙的年龄。通过搜索最老的恒星（例如球状星团里的那些星）和尝试确定它们的年龄，就可以做到这一点。换一种做法，通过测定某些古老的放射性同位素的相对丰度，也可以估计宇宙的年龄。由这两种方法，我们求得宇宙的年龄介于 100 亿年和 180 亿年之间。这个结果不精确，令人失望。因为它并不容许我们去确定宇宙是开放的还是封闭的。

第三种方法涉及测定从宇宙创生以来遗留下来的氘的量。氘是氢的同位素，它常称为“重氢”。且在使氢聚变成氦的热核反应链中，它是一个重要的台阶，大多数天文学家很肯定，大爆炸后不久，原生氢的一个显著部分转变成了氦。在这个过程中，有一些氘被遗留下来；它们是当宇宙的热核反应熄灭时，在从轻的氢转变为重的氦的反应链

之后遗留下来的。这种原生氦的数量对早期宇宙的膨胀速度和密度是很敏感的。由人造卫星观测所测定的氦的丰度，强烈地暗示宇宙的平均密度比临界密度小得多。再次表明，我们居住在一个开放的双曲形宇宙中。

还有另一种方法试图直接测定宇宙的膨胀减速。这是通过测定大数量的遥远星系的红移和距离来得到的。然后把这些数据点在一幅哈勃图中。如果减速的数值很大，那么宇宙在过去的膨胀必定比现在快。如果减速值小，那么宇宙必定是一直以与现在的速率差不多的速率膨胀。把哈勃图延伸出去使它包括由最遥远的星系所得到的数据，这种差异便显示出来。

这个方法应给出直接测定的减速参数。遗憾的是，像其他一切方法一样，观测中有显著的不确定性。

最近，克里斯琴、桑德奇和韦斯特法尔在海耳天文台用此法测定减速参数可以说是最令人鼓舞的尝试。他们在1978年发表的数据表明 $q_0=1.6$ ，它比平坦宇宙的临界值 ($q_0=1/2$) 大得多。并且表明我们居住在一个封闭的正曲率的宇宙中。确实，宇宙的现在年龄只应该是120亿年，并且再过600亿年左右，宇宙的膨胀将会终止。紧接着就将发生宇宙的坍缩，从现在起约1300亿年之后就将发生另一次大爆炸。

如果宇宙是封闭的，那么我们正居住在一个黑洞里。事实上，整个宇宙本身便是一个不可想象的巨大黑洞，它包括了一切时空。于是宇宙的历史简单地说是从200亿年前

的一个过去奇点爆发开始的，然后从现在起算 1300 亿年后掉进一个将来奇点而告终。如果空间里有足够的物质阻止宇宙的膨胀，那么物质所具有的这个密度也足以把整个宇宙包围进它自己的宇宙黑洞之内。当我们的膨胀宇宙逐渐演变成一个坍缩宇宙时，红移有朝一日终究会变成紫移。遥远的星系团——曾经是彼此相隔很远的——将会彼此拥挤在一起。在这个收缩的宇宙里，密度和压力越来越大，这种状态一直延续到时间的终端，展延在空间的宇宙奇点处的一切事物被压挤得不复存在为止。

在宇宙黑洞里宇宙自己吞噬自己。这种宇宙黑洞与我们至今考察过的一切黑洞基本上是不同的。对于普通的黑洞或者超大质量黑洞而言，远离它们处总有富裕的平坦时空。虽然黑洞本身是一个具有极端时空曲率的区域，但是这个弯曲的体积，在远离黑洞的地方，总是与平坦时空平滑地相连接，所以理论物理学家特别推荐地称远离普通黑洞的时空为渐近平坦时空。

黑洞以不可逆的形式吞噬物质。掉进黑洞的物质的许多性质和特性从宇宙里永远地消失了。然而，我们知道有 3 个基本量仍旧保留：质量、电荷和自旋。这些量之所以仍然存在，就是因为它们能被远离黑洞的人们所测定出来。在围绕黑洞的平坦时空里，这些量能被很好地定义。事实上，渐近平坦时空的存在是为什么我们首先能够理智地谈及一个黑洞的质量、电荷和自旋的主要理由。

如果宇宙是封闭的，那么我们注定要掉进包围一切时

空的宇宙黑洞。当坍缩宇宙吞噬它自己时，显然没有渐近的平坦时空与宇宙黑洞相连接。当宇宙急速地进入无限大压力、无限大密度和无限大时空曲率的状态之际，由于没有遥远的参考架，即使物质的最基本性质也完全破坏了。

经过无限弯曲的时空，任何事物都不复存在。科学里的最基本量永远消失了。物理学里描述物质和辐射的内在细节的最基本数变成不确定了。这就是为什么我们不可能理智地询问大约 200 亿年前大爆炸之前曾经发生什么情况。时空的这个区域被过去奇点的无限弯曲时空同我们完全割断了。而我们的宇宙由正是从这个过去奇点诞生的。在“前一个宇宙”里的物质的基本结构，甚至可能与组成我们现在宇宙的原子非常不相同。而且“下一个宇宙”——它将从我们的宇宙的废墟中诞生。

原生黑洞

天地是从哪里来的？一开始它们是怎么样的？宇宙是在什么时候创生的？为什么会创生的？这些便是在人们的脑海里形成的几个最基本和最深刻的问题。它们直接反映了人类所特有的天然好奇心和追根究底的发问。这种渴望了解环绕我们的宇宙的追问正是把我们人类同地球上所有其他形式的生命明显区分开来的根本标志之一。

在古时候，此类基本问题都用神话和幻想来回答。由于缺乏足够的资料，我们的祖先认为天空里居住着神灵和

鬼怪。大多数宇宙学问题，尤其是那些牵涉到宇宙创生的问题，都被解释为一个或几个超人的神灵的直接和神圣的行动。

50年前，人类面对两个重要的天文学发现，它们直接影响到这些古老的宇宙见解。在20世纪20年代，我们发现星系是散布在宇宙中。这些巨大的恒星旋涡可在天空的每一个未被遮挡的部分看到。5年之后，累积了关于这些星系的整体运动的许多资料。到1930年，已清楚知道这些间隔很远的星系彼此奔离越来越远。这便意味着我们住在一个膨胀的世界里。这也意味着宇宙必定是在150亿到200亿年以前，从一个无穷大的密度状态中诞生的。这种宇宙的诞生必定是由一个称为大爆炸的剧烈原始爆炸发动的，这个大爆炸在时间的开端发生于一切空间。事实上，大爆炸是宇宙本身的一次爆发。这直截了当和明显地解释了我们的一切资料。即使到今天，我们仍可清楚看到这个爆发的论证，那就是我们看到碎片——分离很远的星系团向前冲向黑暗空虚的宇宙空间。

尽管有这些重要的天文发现，但我们常因尚不知晓的事物如此之多而感到惊讶。例如，我们还没有确证星系是怎样和为何形成的。但我们知道一个星际气体和尘埃云如何凝聚成恒星。我们也较清楚行星的形成：伴随着恒星的诞生，少量的石块和冰块遗留下来结合成小行星、行星和它们的卫星。然而尚没有人在发展关于星系形成的一种同样完善和周详的理论上取得成功。星系是宇宙间最大的个

体。一个典型的星系直径为 10 万光年，且包含相当于几千亿个太阳的物质。由于某些还不清楚的原故，早期宇宙注定要碎裂成巨大的团块，就是这些团块最终变成星系。

宇宙在最大尺度上是显著的平滑和均匀。假使我们凝视几亿光年远处，由于距离的跨度如此之大，致使个别星系变得很小而不被注意到，我们便发现宇宙在各个方向是极其均匀的。这意味着早期宇宙必定也曾是在各个方向非常平滑和均匀的。但是它不可能完全平滑。如果就在大爆炸之后，宇宙便是完全均匀的，那么今天它也必将是完全平滑的。于是将不会有星系、恒星，也不会有行星，更不会有人类。所以新生宇宙的外观上必定曾经有过一些结节和团块，有过某种轻微程度的不均匀性。

即使不考虑星系形成的任何详尽理论，但有一点是清楚的，那就是星系必定起源于恰好在大爆炸之后存在于宇宙间的某些细薄的团块。当然，如果一个原生团块要成为一个星系，它必须包含或引力吸引相当于星系质量的物质（也就是说，大约 2000 亿或 3000 亿个太阳质量）。这似乎令人觉得好像我们需要一些巨大的团块以形成星系，然而并不是这样。新生宇宙是如此难以置信的致密，仅仅稍微有一点偏离完全平滑状态，便足以生成含有所需物质数量的团块。例如，计算表明一团星系大小的物质只要它的密度比宇宙的平均密度增长 1% 就足以创生一个星系。

在任一种关于密度涨落的合理的理论中，小团块总比大团块容易形成。因此，对应于每一个在大爆炸之后就存

在的星系大小的团块，必定还存在大量较小的团块，它们之中的每一个包含少量的物质。此外，在这些细小的团块里，密度的增长比在较大的团块里显著得多。一个星系大小的团块仅牵涉到其密度比周围密度增长1%，而10亿吨的一个团块（大约是1颗小行星的质量）其密度可能发生100%的增长。在新生宇宙里大尺度的密度涨落（1%）最终演化成星系，包含了我们在天空中看到的一切恒星、星云、行星和卫星。然而对于所有那些微小尺度上的密度涨落，特别在那些比它们的周围包含多得多物质的团块里（密度增长100%），将会发生什么情况呢？

早期宇宙必然是极其灼热和极其致密的。我们根据外推回溯到大爆炸时刻，便得到此结论。例如，大爆炸之后的1%秒时，温度一定有1000亿度，并且在整个空间里的平均密度大约是每立方厘米40亿克物质（相等于每立方英寸7万吨）（1英寸=0.0254米）。

1971年，剑桥大学的霍金提出，在早期宇宙如此拥挤的条件下，所有那些细小的超密的团块都可能压缩而形成无数微黑洞！在霍金提出此见解之前几年，前苏联物理学家采尔道维奇和诺维可夫曾提出了类似的见解，可是正是由于霍金的分析，才吸引了许多科学家去认真考虑宇宙间寄居着大量的非常微小的原生黑洞的可能性。

这确是一个令人惊奇的预言。在霍金之前，每个人都坚信黑洞只可能由大质量恒星的死亡而创生。因为小质量恒星（像太阳）在到达它们的生命尽头时将变成白矮星，至

于中等质量的恒星则变成中子星，而只有最大质量恒星的遗骸才具有足够的物质克服它们的内部压力，从而完全坍缩成黑洞。这些“经典黑洞”的最小质量是太阳质量的 2.5 倍。可是现在我们知道在新生的宇宙里小尺度的显著的密度涨落能够压挤而成微黑洞。当早期宇宙起劲地膨胀时，小尺度的超密的团块遗留下足够多的物质，它们有效地阻止了这些团块参与宇宙的膨胀。于是在适当的压力和密度的条件下，这些团块能够暴缩而形成原生黑洞。这个情节在 1979 年已被包括采尔道维奇和诺维可夫在内的两个前苏联天体物理学家小组用电子计算机详细的计算所证实。质量小到几十万分之一克的黑洞可能就是以这种方式创生的。

这些原生微黑洞不大像它们的巨大的恒星兄弟，它们具有一些惊人的性质。为了了解这些性质，首先我们必须估价这些原生黑洞事实上是多么地微小。例如，设想 1 个原生黑洞重 10 亿吨（这大约是地球上一座典型的山的质量）。在一个 10 亿吨的原生黑洞的情形里，这些物质被压缩在它的事件视界里，它的事件视界的直径等于 10^{-13} 厘米。也就是大约等于 1 个质子的大小。所以我们知道了 1 个典型的原生黑洞包含相当一座山的质量而它的大小大约是比较原子还低一级的粒子的尺度。

黑洞的这种爆发过程意味着如今微黑洞不复存在。原生微黑洞如此之热，因此如此狂暴地蒸发，致使它们不可能长期生存。例如，1 个 100 万吨的原生黑洞只需 30 年便

完全蒸发和爆发了。大爆炸之后 30 年，所有质量小于 100 万吨的原生黑洞以剧烈的伽玛射线暴方式爆发了。较大的黑洞较冷，因此以较缓慢的速率辐射粒子。它们生存的时间较长。例如，1 个 10 亿吨的原生黑洞能支撑近 3 亿年。

因为宇宙的年龄大约是 200 亿年，所以我们可利用黑洞的质量与寿命之间的关系来预测能够生存到现今的原生黑洞的质量。答案是 40 亿吨。质量大于 40 亿吨的原生黑洞足够冷，所以蒸发充分地缓慢，它们应该仍存在于今。

我们能找到多少个这种小黑洞浮游在空间呢？几乎没有人猜测。当然，如果紧跟着大爆炸之后的压力和密度的条件不对头，那么没有一个这样的黑洞能形成，且如今 1 个这样的黑洞都没有。可是，另一方面，根据我们所知关于宇宙的一切，我们不可能判定这种黑洞是极其丰富的。一些合理的估计数目大到认为就在我们自己的太阳系里可能有一个或两个这种原生黑洞！未知的、看不见的这种强大的致密能源同所有其他行星、小行星和流星体一起绕着太阳运转。

这个可能性是充分合理和引人入胜的，于是提出了一系列建议，在本世纪 80 年代里在航天飞机上安放一架伽玛射线望远镜。这架望远镜将设计用来搜索天空中的高能（10 兆电子伏特）伽玛射线，它们应来自于 1 个重几十亿吨且正在蒸发的黑洞。

在我们太阳系里寻找一个这样的黑洞，其含意是令人惊讶的。完全有可能，把这个黑洞带回地球，在技术上是

可行的。毕竟，黑洞的质量可同一颗小行星的质量相比拟，且多年来，一直有关于开发小行星带的现实讨论。原生黑洞能够放入绕地球的轨道。它的伽玛射线可能转换成微波，发射到地面接收站，在那里辐射进一步转换成电力。霍金估计一个黑洞的输出功率将是 6000 兆瓦（1 兆瓦 = 10^6 瓦），相当于 6 个大核电站。

一个这样的绕地球运行的原生黑洞也将使热核武器整个儿无用。早在任何粗陋的洲际导弹从地下发射出来之前，强大的微波束以光速聚焦在军事设施上。在 6000 兆瓦的强度下，地面将变成一个沸腾的熔岩块。

从黑洞而来的强度较弱的微波束能用于人口控制。人口拥挤使人们被迫接受持续不断的低水平的生活。这些微波能引起足够的染色体破损和生殖缺陷，因而子孙的繁殖变得不可能了。

在任何一种情节里，极其重要的是保证原生黑洞的质量大于 40 亿吨。较小质量的黑洞有完全蒸发和爆发的危险。这种事件将对环境产生 1 种破坏性的冲击。实际上，有人提出 1 个邻近黑洞在几百万年前的爆发所产生的充足的辐射量造成了恐龙的绝灭。

当然，总是有这种可能性，即紧接着大爆炸之后的条件并不有利于原生黑洞的创生。在那种情形里，最小的黑洞是由烧尽了的恒星的遗骸形成的，且至少包含 2 倍半太阳质量的完全坍缩的物质。如我们已知，这些黑洞仍然是极其冷的（典型的温度是绝对零度之上百万分之一度），于

是在宇宙的随便哪个地方都没有黑洞的蒸发。事实上，由于宇宙微波背景是绝对温度 3° ，所有这些普通的大黑洞所吸收的辐射比它们发射的辐射更多。

然而，有朝一日这一切将发生变化。我们发现 10 个太阳质量的黑洞（像天鹅座 X-1 系统里的 1 个），它的寿命长达 10^{67} 年。在这漫长的年代里，恒星形成的黑洞将以激烈的伽玛射线暴的方式爆发。当然，只有假若我们居住在一个永远继续膨胀的“开放”宇宙里，这才会发生。然后只要宇宙生存足够长，大黑洞便会有完全蒸发的危险。老早之前，其他显著的变化便已发生。从今起仅隔 10^{13} 年，所有的氢和氦——形成新生星的气体——将完全用尽。自那时起，没有新的恒星形成。而且所有年老的恒星，根据它们的质量，将变成寒冷的白矮星、中子星或者黑洞。此后宇宙将是黑暗的——令人窒息地黑暗延续亿万年，直到遥远的年代，其时广布的黑洞状恒星遗骸在最终的时刻短暂地点亮了天空。

当我们的观念外推到如此遥远的将来时，产生 1 个问题。为了估价这个问题，自然回忆起黑洞吃东西。在这样做时，黑洞把信息从宇宙中消除。例如，一切关于向黑洞下落的物质的化学组成、颜色、形状和结构的数据，在它掉进黑洞之际完全破坏了。事实上，如我们所知，只有下落物质的质量、电荷和自旋是保留的。由于这个原故，黑洞被恰当地称为“信息隐藏处”。它们是有关下落物质的信息永远离开宇宙的地方。

因霍金发现黑洞的蒸发，我们才了解到粒子真的能从黑洞里出来。当然，这种量子力学过程仅对微黑洞才是重要的。然而，这种物质的外流，意味着原生黑洞似乎像白洞。一个白洞只不过是时间倒流的黑洞。它是喷发出东西的一个场所（与其说是掉进东西的一个场所）。事实上，在1975年，霍金成功地证明了在量子级别上，原生黑洞不可能与白洞区别开来！

当物质从一个原生洞外流时，新信息被引进宇宙。原则上，物质从这种洞中喷发出时，它携带了颜色、结构、化学成分——一切在这以前并不存在于宇宙里的新鲜资料。所以一个原生（黑或白）洞是一个“信息源”。

构成霍金的蒸发机制的量子过程基本上是随机的。由于测不准原理，我们不可能预测一个单独的粒子会在什么地方和什么时候出现。所以从这些洞中的一个注入宇宙的资料基本上也是随机的。这便是霍金最近把它公式化了的随机原理的实质。就像海森堡测不准原理一样，随机原理也是对我们认识客观存在的能力所具有的基本局限性的一种叙述。如果有正在蒸发的原生洞散布在空间，那么新粒子、新资料和新信息便以完全随机的、不可预测的形式流入宇宙。当科学家们试图了解宇宙的游戏时，他们发现扑克牌和玩牌者来去是几乎不注意任何规则的。

爱因斯坦从来不喜欢量子力学，虽然他本人在建立这个领域中起过重要作用。他讨厌量子物理的不可预测和测不准。他以“上帝不掷骰子”的说法来表达他的那种厌恶

的心情。

虽然本书证实了爱因斯坦的天才,可是在这一点上,他是错了。量子力学是有效的。在量子世界里,有一种固有的不确定性。但是由于霍金的发现,可能有的随机程度甚至扩展到了整个宇宙。正如霍金所陈述:“上帝不但玩骰子,而且有时候也把骰子掷到看不到它们的地方。”

黑洞对人类可能的影响

我们巡视了从黑洞这个概念可能引伸出来的一些问题。虽然还缺乏观测证据，但是我们有充足的证据来证实理论上的推论。黑洞的概念又引起更广泛的推测，包括黑洞是否可能对人类后代有影响。大部分推测是引人入胜的。在这里，我们来探索一下这些概念。虽然这些推测有理论基础，但完全是些假设，我们只能把它当作谚语而不可全信。

黑洞对星际航行的威胁

有一天将可以进行星际旅行不是不可信的。人们认为到遥远的星系去旅行并不比今天“阿波罗空间计划”或“天空实验室”的空间探索来得更可怕。关于这一点，人们常说黑洞给星际航行带来了严重的威胁。显然，一艘宇宙飞船驶进了一个黑洞将遭到一场灾难——即使它通过视界进入黑洞侥幸活下来，也永远逃不出来，最终还是被毁灭。

密近双星中的黑洞不会引起什么问题。我们能从它对可见伴星的影响测到。但宇航员看不到单独的黑洞，除非它们被一片将要落到黑洞里面去的物质云包围着。但是当

你想到银河系中有多么广阔空虚的空间时，你会相信宇宙航行员与普通恒星相撞的机会也是极少的。如果我们假设黑洞只是由那些大质量恒星形成的，而这些大质量恒星在整个星系中只有很少一部分，那么碰撞的机会就更少了。因而我们得出结论：黑洞对星际航行看来未必会造成威胁。如果宇宙飞船接近黑洞，那么就能对它们进行仔细的考查。

黑洞使时间变慢

不断接近黑洞能使特别勇敢的宇宙航行员获得几乎无限长的寿命，这是与他生活在地球上的同胞相比而言的。我们已经知道强引力场能产生时间变慢效应。在黑洞附近，越接近视界的人与遥远的观察者相比，他的时间就显得越慢。同样，潮汐力也产生了，宇宙航行员不得不按一条巧妙的路线驾驭飞船，在最大的时间变慢和毁灭性的潮汐力之间取得平衡。原则上这是能够办到的。

在这种情况下，一个宇宙航行员并不感到他比平常生活慢，但他的飞船里的一切时间过程钟表等等，都以同样的速度慢下来。但如果他在黑洞“旅行”间定期返回地球，他会发现地球上的这段时间要长得多，或许已经过去了几千年，他将发现一个与他离开时完全不同的世界。

时间的相对论问题是一个使人不解的问题，重要的一点是根据狭义相对论，一艘高速飞行的宇宙飞船中的时间较一个静止的地面观察者的时间要慢。广义相对论告诉我

们，强引力场也能产生同样的效果。在实验误差极限内，两种说法都得到了检验与证实。这种情况好像真的要发生了。最重要的是你自己的时标在起作用，如果你掉进一个黑洞，你会不愉快地回忆起对外部观测者来说你用了无限长的时间越过视界。你的时标走得很快，而结果几乎不是你所预料的。

如果一个未来的宇宙旅行家企图按这种方式来延长寿命，很明显那是危险的。而且如果他为了要在一定的时间内到达遥远的黑洞，必定要以接近于光速的速度飞行，近距遭遇的危险性，似乎是得到证实的。总之，他在以接近光速的速度飞行时，都能感觉到时间变慢。越接近光速，这个效应就越大。

这种机会是否出现过，未曾有人尝试过！现在面对着人类的最大挑战之一是以最短的时间单独环游世界（绕过好望角是最危险的时刻之一）。如果我们的银河系中央果真有个大黑洞，那么未来的挑战可能是以最长的时间（按地球上的标准来说）来环游银河系。越过黑洞的视界时所冒的风险给探索添加了更大的趣味！航行者越接近视界，时间变慢效应越明显；同样，无意中落进黑洞的危险也越大。

向黑洞索取免费的能源

大量的能量可以引力波的形式从黑洞释放出来。例如落进视界中的物质就是如此。这就使我们推测在未来的某

一天由于技术的不断进步，所需的能量和动力日益增多，向黑洞索取能源这个问题就会得到重视。普林斯顿大学的弗里曼·戴森早就指出过这种可能性，进步的人类能发明利用恒星的全部输出能量的方法，在这些恒星周围建设广泛的区域。例如收集它们发出的所有辐射转换为有用的功。“戴森区域”就能够使恒星在发光的整个期间，以不变的速度提供给我们巨大的能量。

牛津大学丹尼斯·西塞亚玛向我们描绘了这样一种方法：向旋转的黑洞索取能量。如果在一个旋转的黑洞周围造一座立体的架子，那么黑洞与架子之间的相互作用力将使架子旋转。这时就会发出我们可以把它当作能源来控制的引力波。西塞亚玛没有说这种方法是完全合乎现实的，但毕竟提出了我们能向黑洞索取能量的原则上可行的另一种方法。

罗杰·彭罗塞按同样的方式提出了向黑洞的“能层”放入一重物而获得巨大能量的方法。“能层”即视界周围的含有强引力场的一片区域。毫无疑问这需要一根无限坚固的绳子！

黑洞炸弹

用最纯粹的至少显然可以应用的物理概念来制造毁灭性武器的方法具有可怕的不可避免性。“相对论”本身也是这样。爱因斯坦的能量与质量之间的关系 $E=mc^2$ ，是他在

对空间与时间进行了认真分析之后得出的结论，为裂变和聚变核爆炸的工艺提供了基本线索(虽然我们不能记忆，它也告诉我们太阳和恒星是怎样发光的，以及我们怎样能在地球上得到巨大的能量)。同样，加利福尼亚理工学院普雷斯和托伊科夫斯基也讨论了一种把黑洞作为一颗炸弹的假设性方法。在一定条件下，长波无线电波从一个黑洞“弹射”出时可以增强。这种增强是微弱的。但如果黑洞周围有一些能反射 X 射线辐射 99.8% 的镜子，每次相遇同一电波从黑洞弹回的强度都会增大。电波以幂数形式增强，因此过了一段时间辐射将增强到使镜子会在一次大爆炸中四分五裂的程度。幸好，这是一种非常不便的武器，我们没有必要担心！

黑洞与引力波

引力波的产生

怎样才能产生引力辐射，即引力波呢？我们考虑一个由大质量天体组成的集合，这些天体具有恒星的大小或者更大一些。它们可能是一些单个的恒星，也可能是将要剧烈演变的一个更大的恒星中的若干部分。将这些天体非常紧密地靠在一起，然后使它们猛烈地向四周飞散，或者彼此间迅速地绕转，或者相互混乱地坍缩在一起。这种急剧演变的天体或天体集合会成为一个引力辐射源。

是什么样的东西产生引力辐射？设想我们非常靠近这些天体，测量这些急剧坍缩或者快速旋转物质的集合的引力场。这些大质量天体的每一个都是引力源，它们来回运动，我们测量到的引力场的强度和方向也随之迅速地变化。靠近无线电发射机的人也会发现类似的变化电场。

上述两段描述并不涉及任何特殊的引力理论，它们也可以出现在牛顿理论中。但是，根据爱因斯坦引力论，在急剧加速的天体附近，人们所看到的变化着的引力场将以光速在空间中传播，其方式同电扰动以电磁辐射的形式传

播一样。通过测量某一个地点的引力场的微小变化，宇宙中任何地方的人都可以探测到这种引力辐射。

因此在原则上，引力辐射是可以存在的。但是作为科学家，感兴趣的是真实的而且是可观测的现象，而不是仅仅在“原则上”存在的现象。黑洞与中子星作为原则上可能存在的天体湮没无闻了几十年，这是因为在 20 世纪前半期的技术条件下，它们是不可能被发现的。引力辐射有着类似的历史，理论上发现存在引力辐射到首次探测它，间隔了很长的一段时间。第 1 架先驱的引力波望远镜的研制，以及对于天体物理中一些剧烈事件能够产生可探测的引力辐射这种现象的认识，使人们复苏了在这方面的兴趣。

引力辐射的探测是一项困难的工作。考虑两个相隔一定距离的质体，如图 15 所示。当引力波经过时，它们附近的引力场就稍有起伏，因而它们开始前后地运动。通过观察它们微小的运动，我们可以探测到引力波。看起来这是很简单的，实际上却极其困难。假如在 10 秒差距远的地方有 1 颗质量为太阳 10 倍的恒星正在坍缩形成黑洞，而且如果这个事件是以想象得到的最大速率产生着引力辐射，那么上述两个质体之间距离的变化只有 $1/10^{14}$ 。探测引力波是一项困难的工作。

在大质量天体互相绕转或者极快地加速的情形下可能产生大量的引力辐射。如果在星团中心的大质量黑洞即将吞食 1 颗恒星，那么这个过程的最后阶段就会引起这颗恒星急剧地加速，它产生的引力场就会发生相当大的畸变，产

道想的引力波望远镜

10^{14} 分之一



韦伯棒: 实际的引力波望远镜

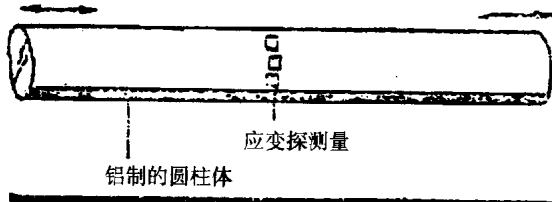


图 15 引力辐射探测器

生出可以探测的引力辐射爆发。两个黑洞之间的碰撞——一种很不可能的事件——会产生出大量的引力波。大质量恒星演变到 neutron 星或者黑洞状态的最后坍缩似乎是产生引力辐射的最猛烈的活动。很可能但还不能肯定的是，这个最后的坍缩是混乱地发生的，从而引起了产生引力波所需要的剧烈运动。迅速地作轨道运动的双星是激烈程度较低的引力辐射源。一个这样的系统发出的引力辐射可能已经被间接地探测到了。

可能发现了引力波——双脉冲星

50年代末和60年代初，几位天文学家进一步作了一些数字估计，充实了上面描绘的引力波图像。这些计算表明，探测任何一个符合实情的小源发出的引力波是极其困难的。为了产生足以观测到的引力辐射，就需要诸如在太阳附近1个秒差距内的超新星爆发的偶然事件。引力波研究的前驱者韦伯不断地进行了探索，并且建造了第1架引力波望远镜。他自称实际上已经探测到了引力波，但人们并不相信，因为其他人都未能重复他的观测。尽管如此，在这个领域进行研究的天文学家和物理学家鉴于韦伯的开拓工作而给予他极大的荣誉。

韦伯的探测器是现代正在建造的先进引力波望远镜的原型。一个理想的引力波探测器由两个质体组成，当引力场的一个波动经过时，它们就会彼此相互振荡。在现代，实际的探测器是一些很长的铝棒。当一个引力波经过时，棒的每一端都要运动。而且，由于两端是分开的，所以它们的振荡是不同的。棒两端不同的运动要引起应变，这种应变由安装在棒中部四周的探测器检测。如果在10秒差距远处有一个正在形成之中的黑洞，它的质量等于太阳的10倍，它在形成时非常混乱地坍缩是我们所能够想象到的最强大的天体引力辐射源，在棒上产生的应变约为 $1/10^{14}$ ，或者100万亿分之一。

70年代初期，先驱者韦伯声称他的探测器实际上已经发现了引力波，这使天文学家大吃一惊。如果他的发现是正确的话，那么银河系中心一定存在一个难以令人相信的强大的引力辐射源，因为这些辐射似乎来自银河中心。他的结果公布后不久，其他许多研究者都建立了他们自己的辐射探测器，虽然这些实验更加灵敏，但是没有一个人能够证实韦伯的结果。这时，舆论一时认为韦伯的数据分析程序有错误，几乎没有天文学家认为他真正发现了引力波。

尽管这是一个假警报，但引力波天文学家并没有认输。现代实验的努力都是建立在韦伯原始观念的基础上。更加灵敏的望远镜使用更好的材料，使棒冷却，以便热振动不会使应变检测器产生酷似引力波的信号。然而就直接肯定的结论来说，前景并不美妙，即使80年代初期的探测器也不能够发现大质量恒星坍缩时发出的引力辐射，除非这颗恒星位于10秒差距左右的范围内，而这种事件几乎不大可能。引力波天文学甚至还未处于它的摇篮时期，它还处于酝酿阶段。

虽然引力波的直接探测仍然是未来的事情，引力波还是可以被射电天文学家间接地发现。双星可能是很好的引力波源，由两颗相互绕转而快速运动的恒星产生的波动引力场可以带走能量。但是对于大多数恒星来说，轨道的观测是很不精确的，而且它们的运动也很慢，以致于由引力波带走的极少的能量在几百年内都不可能探测到。但是，1975年发现双脉冲星PSR¹⁹¹³⁺¹⁶以后不久，出现了大量理论

上的论文,论证引力辐射会从这个系统带走可察觉的能量。1978年末,一个射电天文学家小组宣布他们已经发现了这个系统能量的变化,它同由于引力波所预期的能量变化值是相等的。

PSR¹⁹¹³⁺¹⁶由两颗中子星组成,每1颗星的质量大约都等于太阳的1.4倍。它们沿椭圆轨道互相绕转。平均说来,它们的距离等于太阳半径的2.8倍,它们沿轨道绕转1周的时间为7.75小时,它们的平均轨道速度大约等于光速的1/1000。这种快速运动产生引力波,使它们的轨道运动周期每年减少1/10000秒。1978年底,在德国慕尼黑举行的“得克萨斯”相对论天体物理讨论会(这些“得克萨斯”讨论会最初在得克萨斯举行,但是现在在各个不同的地点举行,其会议文集由纽约科学院出版)上,马萨诸塞大学的泰勒、麦卡洛奇和福勒宣布了他们发现这种轨道的减小。虽然引力辐射的这种发现只是间接的,但如果它经得住科学上关键性的详尽研究,那么这就代表了爱因斯坦理论的一个重要证据。此外,如果引力波是存在的,那么罗森的引力理论就被证明是错误的,因为这颗双脉冲星产生非常多的引力辐射,这是同它轨道变化的观测一致的。

引力波代表了一种推测性研究的前沿。爱因斯坦的广义相对论预言它一定存在,然而它是非常微弱的,因而难以发现。引力波的直接搜寻工作还未成功。这种辐射唯一真正的探测是间接的,它是基于1颗双脉冲星轨道的仔细观测。不过,即使人们认为引力波还未被发现,它也仍然

处于科学研究的主流之中。理论上，它们的存在有着坚实的基础，原则上它们是能够而且相当可能在实际中被观测到。黑洞研究的外缘领域所涉及的研究工作在理论上没有牢靠的基础，也不可能用观测来检验，因为它们涉及一些未知的、迄今也不可能知道的黑洞内部深处，即视界以内的空间区域的情况。

搜寻引力波的意义

引力是物质世界的一种客观属性。大科学家牛顿以精确的数学形式表述了万有引力定律，建立了人类对引力认识的第一座里程碑。后来，由于牛顿引力理论对解释一些天体物理问题（例如水星近日点进行）遇到了困难，爱因斯坦于1916年提出了著名的广义相对论，其中预言，宇宙中存在着引力波。

在爱因斯坦预言引力波存在之后的许多年中，科学家们做了不少实验来搜寻引力波。美国马里兰大学的韦伯教授，是第一个从50年代开始就认真进行引力波测定工作的人。韦伯把一个铅桶悬在真空室内，使它冷却到接近绝对零度（ -273°C ），然后测定来自太空的引力波穿过铅桶所引起的微小膨胀和收缩。后来，国际上许多研究者都效法韦伯研究引力波。遗憾的是，人们始终未能直接搜寻到引力波。其根本原因在于，引力效应极其微弱，使得处理引力的一些具体技术问题很难解决。

1974年10月，在波多黎各的阿雷西博射电天文台，美国科学家泰勒等人应用世界上最大的射电望远镜，发现了1颗脉冲星——PSR¹⁹¹³⁺¹⁶，这颗距地球16000光年的星，竟以每秒300千米高速与一个黑暗的伴星互绕转动，但其转动周期在4年中缩短了0.4毫秒（即每年缩短0.1毫秒）。这意味着它的能量由于不断辐射引力波而在逐渐地损耗。泰勒把观测值与根据广义相对论理论计算的值相比较，发现符合得很好。由此，间接地证明这颗脉冲星在辐射着引力波。4年之后，泰勒在国际天体物理学大会上宣布了这一观测结果，当即在科学界引起了轰动。我国广州中山大学的科研工作者也建立了一套引力波探测系统，其灵敏度业已进入世界先进行列。

美国加利福尼亚理工学院有人提出用激光“天线”来探测引力波，其方法是使激光束往返于地球与月亮之间，当引力波通过时，可测量这两个天体之间距离微小的改变。有的理论物理学家估算，银河系中每年至少有一次因星球的坍缩引起的重大引力波事件。由脉冲星和双星强有力的运转也应该提供连续不断的引力波。此外，在1年中，由黑洞吞掉物质应当产生10~15次引力波的巨大变化。大多数物理学家确信引力波是确实存在的。

科学家们一旦测到引力波，并能进行常规测定，将会为人们提供首次（也是最好的）机会来研究恒星和黑洞中心所发生的巨大变动。引力波代表物理学上一个令人振奋的新境界。有人设想，由于引力波不会被屏蔽，可利用它

作穿透地球的通信联系。引力波也将成为宇宙的“电视”波，宇宙中的每一件大事都会作为一个节目而被播放出来。通过引力波的研究，很可能解开许多现在用光学望远镜和射电望远镜所难以揭示的宇宙秘密，为观测宇宙学打开一个新的“窗口”。

相对论基本原理与黑洞的新观念

牛顿的绝对时空观

任何事物都不能离开时间、地点而超然存在。所有的物质运动过程，不仅都需要时间，而且都要在时间空间这个“舞台”上来完成。即使描述一个最简单的自由落体或理想的抛物运动，也离不开空间坐标及时间变量。因此，有关时间及空间的概念，在物理学中一直是极其根本、极为重要的。

自古以来，人们常常自觉不自觉地把时间及空间的概念绝对化了，世代相传，沿袭至今（其所以如此根深蒂固，很重要的原因，是大家根据日常活动中的亲身体验，觉得时间和空间就是这样的）。当我们说，从北京到上海的班机飞行了1时50分时，这个时间不仅对北京机场、上海机场的人来说是这样，对机上的人员来说也是这样。按照牛顿的观点：绝对的、真正的及数学的时间，是自身在那里的，这叫做时间的绝对性。正是根据这种观点，才在所有的参照系里都使用一个共同的时间变量，“同时”的概念是绝对的，事件发生的时间顺序也是绝对的。同样，某一距离的

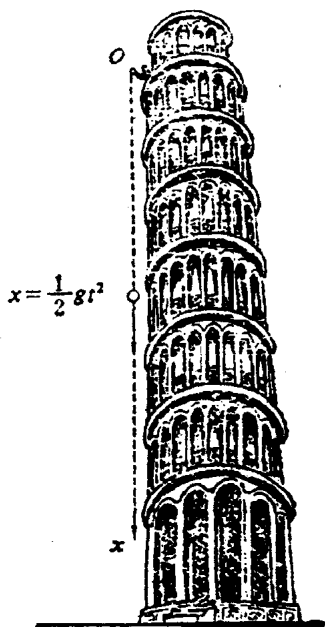


图 16 自由落体运动

长度，无论在地面上测量，还是在飞机上测量，一般总认为测量结果是相等的，这就是长度的绝对性、空间的绝对性。对时间和空间的这种看法，叫做绝对时空观。

在物理理论中，力学是最早成熟的一门学科。牛顿（I. Newton, 1642~1727）在前人工作的基础上，根据自己的研究成果，于 1687 年出版了他的代表作《自然哲学之数学原理》，它标志着第一个完整的力学体系的建立。在这

本书中,牛顿选择了若干公理作为整个力学大厦的基石,其中包括了绝对时空的假定;并且将机械运动的基本规律,明确地总结成著名的牛顿三定律。

大家知道,在牛顿力学的理论体系里,其核心正是牛顿的3条运动定律,以此为出发点,经过严密地逻辑推理,可以导出一个又一个的力学定理。这些定理,极有成效地用于刚体、流体、振动、波动等机械运动的各个领域。

但是,作为普遍规律的牛顿定律,并不是在所有参照系里都一律有效!通常,在地面参照系里(忽略地球的自转效应),牛顿定律被认为是近似正确的。例如,矗立在道路两旁的楼房,它们所受的合外力为零,对地的加速度也为零。如果我们以行驶中的汽车为参照系,在车中来观察这些楼房,当汽车加速、减速或拐弯时,这些楼房相对汽车的速度显然不为零,然而按照一般的理解,它们各自所受外力的总和仍为零,这就与牛顿第二定律或第一定律(惯性定律)严重抵触。从而表明,不是所有的运动物体,都适于被选为运用牛顿定律的参照系。在物理学里,将牛顿定律在其中有效的那些参照系,叫做惯性系。

人们早就认为,宇宙万物都好像是处在一个绝对静止的大容器里。牛顿继承了这样一个古朴的思想,以这个无所不包的容器空间为绝对空间,而绝对空间则是一个最基本的惯性系。然而,不仅“绝对空间”不是唯一的惯性系,牛顿自己总结出来的力学规律,也丝毫反映不出这个容器的客观存在,应用动力学的知识,根本无法判定哪个惯性

系是绝对静止的。

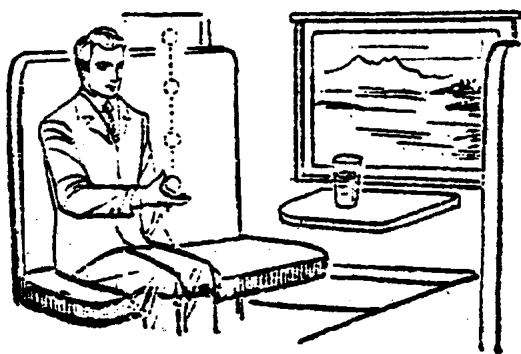


图 17 平稳奔驰的火车中

当火车平稳地匀速直进时，乘客在车内所进行的活动和看到的各种现象与在地面上一模一样，杯中的水面平整如镜，抛起的小球仍是直上直下运动的（图 17）。特别是，当车窗外还并列有另一列火车行进时，这时，即使你向窗外看去，也难以判断是哪列火车在动（相对地面）。这一规律，在我国是知道得很早的；东汉郑玄（127~200）著的《尚书纬考灵曜》一书中就有“地常动不止，譬如人在舟中而坐，舟行而人不觉”的记载。这些情况表明，在匀速直进的车、船中，其力学规律与地面上的完全一样；用物理学的语言来说，就是相对于某个惯性系（如地面）作惯性运动的参照系（如上述的车、船），它们也都是惯性系，其中的机械运动都服从于牛顿定律。换句话说，牛顿力学对

每一个惯性系都是一视同仁的，牛顿定律在所有惯性系里都有着同样的表达形式。

伽利略、牛顿的力学规律对所有惯性系一律有效，这常常被称之为伽利略的力学相对性原理。其实，所谓力学的相对性原理，正好说的是力学规律的绝对性，即牛顿力学的基本定律在伽利略变换下是不变的。

作为古典力学基本规律的牛顿定律，确实在所有惯性系里都取同样的表达形式，由此可知，在机械运动的范畴里，没有任何一个惯性系优越于其他惯性系。当然，在具体处理某一个力学问题时，并不排斥人们去挑选一个有利于运算的惯性系作为参照系。例如，通常以地面为参照系是方便的，但这决不意味着，在地面参照系里，力学规律的表达比在别的惯性系里要更为简单。从根本上说，在所有的惯性系中地面参照系并不处于独特的地位；依据同一道理，恒星参照系也不例外。因此，在牛顿力学中，绝对空间的假定在逻辑上是完全不必要的，我们也无法利用力学的规律，来论证和检测它是否存在。

尽管牛顿力学中有着很多绝对化的物理概念，这种局限性却是人类在认识自然的过程中不可避免要出现的，并且在一定范围内，它们是客观世界的极好的近似模拟，而力学的相对性原理所贯彻的各惯性系彼此平等的主张，则是物理思想宝库的珍贵遗产，后来爱因斯坦在相对论中继承并发扬了这一思想。

神秘的以太

牛顿力学兴起之后，日趋完善，大至天体的运行，小到声波的振动，用它都能得到正确的结果，于是以机械观来说明所有物理现象的倾向，风靡一时。不仅提出了分子的机械运动模型，用来解释有关冷热的现象，而且在光的波动说成立以后，很自然地将光波类比为声波。声波是靠媒质传播的，既然在地球上能看到遥远的星光，从而认为，宇宙中弥漫着一种无所不在的传光媒质。

这种想象中的宇宙媒质，被人们称之为以太（是 Aether 的译音），其含义后来被理解为传播能量的媒介。虽然根据物体的弹性理论，很难协调以太所应具有的一些自相矛盾的属性，如密度极稀而弹性又足够大等等，然而，人们却长期以来，认为这个难以思议的以太是应该存在着的。

英国物理学家麦克斯韦尔（J. C. Maxwell, 1831~1879）在 19 世纪 60 年代全面总结了电磁理论，并确认光的辐射不过是电磁扰动的传播，认为存在着一种电磁以太的宇宙背景。在麦克斯韦尔的学说里，电磁场依附于电磁以太，电磁场的运动方程——麦克斯韦尔方程组（它们在电磁学里的地位，相当于经典力学中的牛顿定律），原来只是对以太参照系不严格有效；电磁波的传播速率，也只是在以太中才严格地各向同性，即无论向哪个方向发光，相对以太的光速都是同一个恒定值（约为每秒 30 万千米）。

如果宇宙空间确有以太存在，并且光速以恒定的值在其中传播，那么，根据牛顿的绝对时空观可以推得在以太参照系以外的其他惯性系里，电磁场的基本规律不再能够严格地保持麦克斯韦方程组的表达形式。于是，在所有的惯性系中，以太系是一个特殊的惯性系，只是在这个参照系里，真空光速才是各向同性的，电磁场的基本规律才严格地以麦克斯韦方程组的形式表达出来；或者说，以太系在电磁学中是一个优越的惯性系。

这样一来，牛顿所信赖的绝对空间，虽然在他自己的力学体系里并无容身之处，却在麦克斯韦的电磁理论中获得了立足之地，从而有机会在这里显示它自身的存在。承认电磁以太作为整个宇宙的背景物质，实质上就是将绝对空间具体化了。

因此，从原则上来说，我们可以使用电磁学（包括光学）的方法，来探求地球相对以太地绝对运动。为了这一目的，接二连三地进行了一系列的实验，却一无所得。由于这些实验的测量精度都不是很高的，对于它们的否定结果，以太理论能够一一给出巧妙的说明。如果在计算过程中，凡是涉及到物体运动的速率与真空光速之比的平方项 v^2/c^2 以及比它更高次的项都舍掉不要，则在最后的结论中，就不应出现地球的绝对速度。

于是，这些实验一方面鼓舞着那些信奉以太的人们，另一方面也带来了相反的后果。由于这些 v/c 级实验所得出的结论，与仪器在以太中的绝对运动无关，因而在任何一

个惯性系里，都可以得出同样的结论来；这就有利于所有惯性系彼此平等的思想，使得原来对以太持批判态度的人，越发加深了对以太的怀疑。需要指出的是，探测以太的实验中最著名的是迈克尔逊-莫利实验，该实验精度很高，也未能探测到以太，基本上否定了以太的存在。

爱因斯坦的卓越贡献

当很多人在以太危机中千方百计地挽救以太的时候，爱因斯坦（A. Einstein, 1879~1955）却在着手“清洗”以太的工作。

然而，按照爱因斯坦本人的说法，在他创建狭义相对论的时候，迈克尔逊-莫利实验及其有关讨论，并没有对他起多大作用，他说：“直接引导我提出狭义相对论的，是由于我深信物体在磁场中运动所感生的电动力，不过是一种电场罢了，但是我也受到了斐索实验结果以及光行差现象的指引。”这里所说的“感生的电动力”，其实就是感生电动势；而提到的斐索实验等等，都属于 v/c 级的实验。

爱因斯坦正式提出狭义相对论的那一年（1905年），他不过只有26岁，是伯尔尼（瑞士）专利局的一位年轻的职员，他利用业余时间潜心探索物理学的奥秘。在那一年里，爱因斯坦在德国物理学杂志上发表了3篇划时代的论文，其中每一篇都可以使他在物理学中名垂青史。头一篇论文是关于光电效应的，这使爱因斯坦后来荣获诺贝尔奖；另

一篇论文是讨论布朗运动的；第三篇提出了狭义相对论。

否认自然界中以太背景的存在，同时也就在惯性系中排除了优越参照系的存在。于是，各个惯性系在力学、电磁学等方面都应该是彼此存在；于是，各个惯性系在力学、电磁学等方面都应该是彼此等价、相互平等的。这就是爱因斯坦创建狭义相对论的出发点，也是总的原则。将这一思想正式肯定下来，就成为狭义相对论的第一条基本原理——狭义相对性原理。有了总的原则，还得在落实这个原则的具体方案上作出决策，爱因斯坦大胆地假定了真空光速在各个惯性系里是一个不变量，即总是等于 c ，这就是光速不变原理，它是狭义相对论的第二条基本原理。现在分别叙述如下：

1. 狭义相对性原理

这个原理通常被陈述为物理定律(不只是力学定律)所有惯性系有同样的表达形式。

只有这样，各个惯性系在物理上才完全处于彼此平等的地位。可以认为，狭义相对性原理不过是伽利略、牛顿的力学相对性原理的推广；所谓相对性原理，仍然指的是物理规律的绝对性。这一原理表明，我们无法利用物理规律来寻求绝对运动；在所有的惯性系中，我们也无法确认哪一个惯性系是与众不同的。当然，即使在某些物理问题的处理中，选用个别惯性系（如地面参照系、恒星参照系……）比选用其他惯性系明显地带来运算上的方便，这也并不违背相对性原理的基本精神，因为在这些惯性系里，并

不存在什么独特的物理定律。另外，物理规律的绝对性丝毫不意味着同一物理过程在不同惯性系显示的现象是一样的。例如，如果有一个惯性系是随同炮弹一同匀速前进的，则炮弹在这个惯性系里将竖直上下，而不会呈现出抛物线形的弹道。

这原理之所以被称为狭义的，是因这里的讨论只限于惯性系，而不涉及惯性系以外的其他参照系。于是，在物理基本定律中，实际上还要排除万有引力定律；因为引力的存在要破坏惯性系时空的均匀性，引力现象是与任意的坐标变换紧密联系在一起的，对于它们的研究，使爱因斯坦后来又提出了广义相对论。可以这样认为：狭义相对论通过狭义相对性原理，一开始就宣布了这个理论是有局限性的。

严格地说，狭义相对性原理只是在惯性系中排除了优越参照系的存在，但并不排除宇宙中可能存在着浩瀚的背景物质（事实上，确实已发现了这种宇宙物质的存在）。因为即使这样，也只有在此背景物质为惯性参照系，而物理的基本规律对它具有独特的表现形式时，才会动摇狭义相对论的这一基本原理，而事实上并非如此。

2. 光速不变原理

在相对论之前，惯性系之间是通过伽利略变换联系着的；在伽利略变换下，牛顿定律仍然变换为牛顿定律，而麦克斯韦尔方程式则不再变换为麦克斯韦尔方程式。

面临着这种情况，为了贯彻狭义相对性原理，最容易

使人作出的选择，是向古典的电磁理论挑战，修改麦克斯韦尔方程组，使之通过伽利略变换后 D 能保持它们的形式不变。这不仅因为，牛顿力学在当时早已登峰造极，已经在多方面显示出它的无比威力，而且伽利略变换所代表的，又是自古以来支配了人类几千年的时空观。在一般的人看来，这些俨然都是神圣不可侵犯的。

然而，爱因斯坦却别出心裁，反其道而行之；他采取了保留麦克斯韦尔方程式而修改伽利略变换的研究途径。使得在新的时空坐标变换下，电磁场的基本规律——麦克斯韦尔方程式能保持其原有形式不变。这就要敢于向传统的时空观挑战，进而又必然要去触动严谨的牛顿力学。很明显，没有非凡的洞察力及大无畏的革新精神，不可能作出这样的决策。从这里我们可以看出，爱因斯坦确实不愧为一位伟大的物理学家。对麦克斯韦尔方程组坚信不移，这决不是他个人的一种任性的偏爱。爱因斯坦在 1905 年提出狭义相对论的第一篇论文时，其标题就是《论动体的电动力学》，这正表明他对电磁学的深思熟虑。

麦克斯韦尔方程组的一个直接而又重要的结论，就是真空光速 c 与光传播的方向无关。既然确认了麦克斯韦尔方程组在所有惯性系里都同等有效，实质上即确认了所有惯性系里的真空光速都是 c 。引用爱因斯坦自己的话来说：“麦克斯韦尔、洛伦兹理论的成就，使人们对空间电磁场方程的有效性深信不移，因此，也特别相信这样的断言：光是以某一不变的速率 c ‘在空间里’ 行进的。……为了这些

理由,就必须把光速不变定律对于一切惯性系的有效性,提高到原理的地位上来。”

光速不变原理可陈述为:各惯性系里的真空光速都是 c 。

按照近年来最好的测定,光速 c 精确值:

$$c = (2.997924580 \pm 0.000000012) \times 10^8 \text{ 米/秒}。$$

这个原理表明,在每一个惯性原理里,各个方向上的真空光速都是 c ,既与光源的运动无关,也与光的频率无关。显然,光速不变的概念与速度变换的平行四边形法则格格不入的。由此可知,光速不变与传统的时空观尖锐地对立着,它是建立新的时空理论的起点,所以,将光速不变定律作为狭义相对论的一条基本原理,是可以理解的。

关于光的传播问题,在爱因斯坦的脑海里不知翻腾过多少次。当他还是中学生的時候(大约只有16岁),就曾经想象,对于一个以光速随着光波前进的人,光波会是什么样子?10年之后,他才明确地形成了光速不变的概念。

正像牛顿回答不了惯性的起源,爱因斯坦也回答不了真空光速为什么会不变。理论的起点是可以不清楚的。似乎可以说,爱因斯坦在前门赶走了神秘的以太,在后门却又放进了莫明其妙的光速不变原理。重要的是,不仅观测不到以太,而且在一系列的客观事实面前,以太观点难以自圆其说。与之相反,光速不变原理及其推论,除了在理论上是自恰的(即本身是协调一致、能够自圆其说的),更重要的是与所有的实验结果吻合一致。既然光速不变要求

新的时空变换，所以我们可以反过去说：光速不变只不过是新时空观的某种自然反映，它是对时空新认识的一个重要标志。

从牛顿力学、麦克斯韦尔电磁理论，到爱因斯坦的狭义相对论，物理学经历了一次飞跃地发展，很多物理概念都由此而发生了深刻地变化。

时间不再是绝对的，空间也不再是绝对的；原来是绝对的质量、力、加速度等等，都变成了相对的物理量；电场与磁场可以相互转化，动生电动势与场生电动势之间也不存在完全不可逾越的鸿沟。

于是，人们很容易产生这样一种印象，似乎相对论将一切都“相对化”了。其实，相对论里面也有“绝对化”的一面。首先，从某种意义上说，狭义相对性原理使物理学的基本定律（除去万有引力定律）更具有绝对的意义，使它们在所有的惯性系里都有着同样的表达形式，而且，使那些原来彼此无关的物理量，例如时间及空间、能量及动量、电场强度与磁感应强度等等，都一对一对地结成了不变量关系，从而形成一大批新的不变量。这些不变量对所有的惯性系都取同一个量值，所以它们也有绝对的意义。

可以这样概括地说：在狭义相对论中，表面的相对性，蕴藏着内在的绝对性。物理现象是相对的，物理规律却是绝对的；事件的时序可能是相对的，因果关系仍然是绝对的；许多物理量，单个地看是相对的，一对一对组合起来又是绝对的。离开了这些绝对性，就无法具体地谈论那些

相对的表现。总之，狭义相对论比起旧的理论，在更深的意义上反映了自然界的绝对性。

狭义相对论不仅揭示了运动与时空、物质之间的联系，革新了人们的时空观，丰富了科学思想，而且为人类的实践活动，直接带来了巨大的影响。显然，没有质能公式，就没有今天的核能利用；没有高速粒子的运动定律，我们也无法对高能粒子进行理论分析及实验研究。从通常的低速领域延伸到高速领域，物理学也相应地从宏观世界进入到了微观世界。

但是，狭义相对论仍然是一个传统的物理理论，它认为所有的物体（包括高速运动的微观粒子）都严格地有着自己的运动轨道。然而，所有的微观粒子（原子、中子、电子、光子……）都有波粒二象性，明显地不是按照这种刻板的模式运动着，这就极大地限制了狭义相对论的微观物理学中的独立作用。微观世界的物质运动，主要服从于量子力学的规律。

另外，狭义相对论只是局限在惯性系里讨论问题，也没有涉及到万有引力的现象。为了使相对论能用于加速系并能包括万有引力的内容，爱因斯坦自觉地将狭义相对论扩展为广义相结论。

广义相对论基本原理

爱因斯坦在完成了狭义相对论之后，立即着手扩充这

个理论，谋求所有坐标系（不限于惯性系）之间的平等，主张物理规律对所有坐标系都取同样的表达形式，将狭义相对性原理推广成了广义相对性原理。狭义相对论在惯性系中取消了以太参照系的特殊地位，现在，爱因斯坦则进一步要在所有的参照系中，取消惯性系的特殊地位。

当然，从狭义相对性原理发展到广义相对性原理，不可能只靠某个人思想意识的主观扩张，它在物理学中有着潜藏了很久的根子。为了说明这些，让我们重新回到牛顿力学。大家知道，当汽车加速、减速或拐弯时，牛顿运动定律对汽车参照系是无效的。如果汽车相对地面的加速度为 a ，则一直静止在地面的物体（它们各自所受的合外力 f 都为零），相对这个汽车参照系的加速度应该是 a ，物体所受的合力为零而加速度不为零，这就与牛顿第二定律严重抵触。

但是，物理学家早就知道，假定汽车参照系（一个非惯性系）中存在着一一种虚构的“力场”，使得每一物体在汽车参照系中都要受到一个假想力，叫惯性力。当汽车紧急刹车或突然拐弯时，我们在车中很容易感受到这种力的“存在”，好像真有某种力在向前推动。其实，这不过是人体原来运动的惯性表现。这种力，既找不到它的“施主”，也说明不出它是什么类型的力，只是由于参照系（汽车）自身对惯性系（地面）做加速度的运动而产生的。长期以来，大家都认为惯性力是虚假的。

如果广义相对性原理是对的，首先应该说明惯性力的

实在性，说明它同弹性力、摩擦力、……电磁力一样，也是一种具体的力，有着明确的“施主”。爱因斯坦通过对“质量”的思考，找到了解答的途径。原来，牛顿第二定律中的质量，是物体惯性大小的量度，而万有引力定律中的质量，却是标志物体参与万有引力作用的能力。它们涉及到两种根本不同的属性，前者应该称之为惯性质量，后者则是引力质量。通常我们一直没有去区别这两种质量，而统称为质量，这是因为，大量的实验表明，这两种质量总是严格相等（或者说，是严格地成正比的）。这一寻常的基本事实，触动了爱因斯坦的灵感，如果这两种质量本来就是一回事，那么惯性力就可以具体化。

惯性力的引进，原来是为了在加速参照系里能够在形式上运用牛顿第二定律，相应的质量应该是惯性质量。如果它同时又是引力质量，我们就可以对惯性力作出全新的理解。爱因斯坦将万有引力的概念扩大，认为惯性力不过是某种特殊表现的引力，这种惯性引力场起源于所有遥远星系构成的整体。如果将惯性引力场与磁场进行对比，也许可以帮助我们接受这一概念，见表3。

在上述对比中，通常的万有引力则相当于电场力。爱因斯坦为了进一步找出惯性力与万有引力之间的关系，在想象中进行了这样一个“实验”：假定某处地面附近的重力突然消失了，一升降机正以匀加速度 a 向上加速运动，若 a 的量值恰好与原来的重力加速度 g 相等，则升降机内的所有物体，好似仍然受到“重力”的作用，相对升降机自

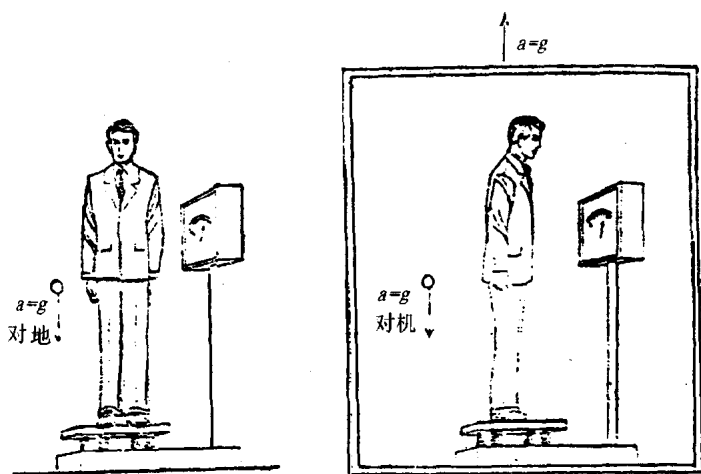
表 3 惯性引力场与磁场的对比

磁场	参照系对场源电荷的速度为零时 参照系里无磁场
	参照系对场源电荷的速度不为零时 参照系里有磁场 (场强与之速度有关)
惯 性 引力场	参照系对星系背景的加速度为零时 参照系里无惯性力场
	参照系对星系背景的加速度不为零时 参照系里有惯性力场 (场强与之加速度有关)

由坠落的加速度依旧是 g ，如果内部有人站在弹簧秤上量体重，测得的结果将与通常地面上测得的完全一样，见图 18。于是，在这种升降机内，惯性力场与重力场的力学表现是等同的。

爱因斯坦更进一步将升降机内的力学过程推广为所有的物理过程，认为无论我们采用何种物理方法（例如，电磁学的方法），也无法在局部范围内（其中万有引力场是均匀的）将惯性力场与万有引力场区分开。这即是等效原理，是广义相对论的第二条基本原理。

从惯性质量与引力质量的相等，到惯性力场的实在化，这不仅为广义相对性原理提供了一个有力的依据，而且通过等效原理导致了加速系与（万有）引力场的统一处理。真



甲：正常情况（有重力）

乙：假想情况（无重力）

图 18 爱因斯坦的升降机

是一举两得！从平凡的事物中悟出不同凡响的道理来，这也是爱因斯坦才智超群的一个方面。

以广义相对性原理及等效原理为基础，爱因斯坦修正了牛顿的万有引力定律，得出一组引力场方程，从而形成应用范围极其宽广的新的引力学说，于1916年正式提出了广义相对论。

然而，爱因斯坦广义相对论的理论基础仍然是有争议的，有些人采用他的数学体系，而不同意爱因斯坦对它的基本概念的解释。惯性力场究竟是不是物质场，还是没有定论。尽管如此，无论在理论体系的完整上，以及与实际

观测的一致上，爱因斯坦的理论都处于领先的地位，它经受了多次的挑战，战胜了不少对手。

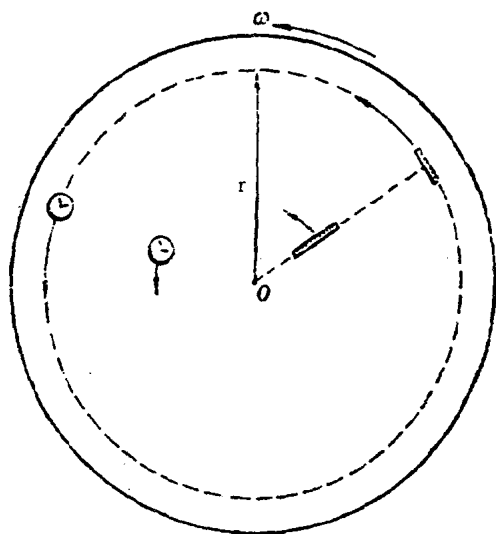


图 19 匀速旋转的圆盘

弯曲的时空与广义相对论的三大验证

为了说明广义相对论里的时间及空间概念，爱因斯坦向大家介绍了旋转圆盘的时空特点。设惯性系 S 中有一个旋转圆盘（图 19），它以角速度 ω 绕通过盘心 O 点的垂直

轴匀速转动。按照狭义相对论的时间膨胀公式，固定在圆盘上的标准钟（ O 点的除外）应该都比惯性系 S 的时钟走得缓慢；而且，离 O 点愈远的钟将走得愈慢。这表明，旋转圆盘上的时间不是到处都一样均匀地流逝。离盘心愈远的地方，那里的向心加速度（或者说，那里的离心加速度）愈大，根据等效原理，那里对应的万有引力场的场强也愈大。因此得知，在引力场中时间的流逝不是均匀分布的，在场强较大的地方时钟相对地走得慢一些，在场强较弱的地方时钟相对地走得快一些。各处时间流逝的快慢，取决于引力场的分布状态，更彻底一些说，取决于场源物质的分布状态。

将以上的讨论引申下去，不难得出：地球附近的时钟要比太阳表面的时钟走得快一些。如果将发光的原子当作一只时钟，而光的频率直接表示了这种“时钟”运行的节奏，那么，从太阳辐射到地面的光，它的频率将比地球上同类光的频率偏小，或者说它的波长将向长波方面偏移（图 20）。这就是提到过的引力红移。

引力红移不仅多次通过天文观测得到证实，而且自 1960 年以来，又利用地球表面附近的重力场，通过高度差带来的场强之差，直接进行了验证实验。例如，取光源的位置高于接收器，即光源处于重力场中场强较弱的地方，这时得到的是“蓝移”（波长向短波方面偏移）。实验结果与广义相对论的计算值非常一致。

现在，我们再回到旋转盘（图 19）的空间特性上来。将

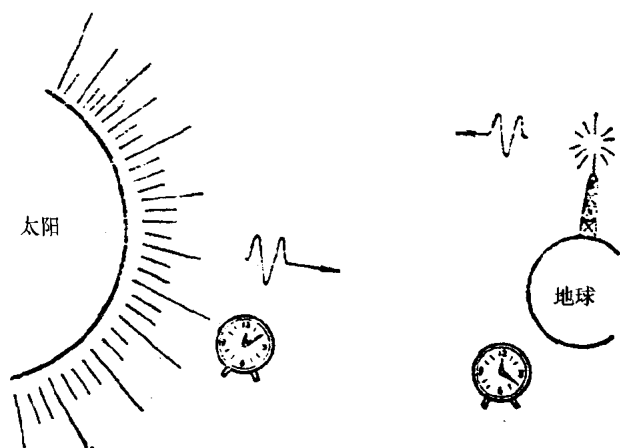
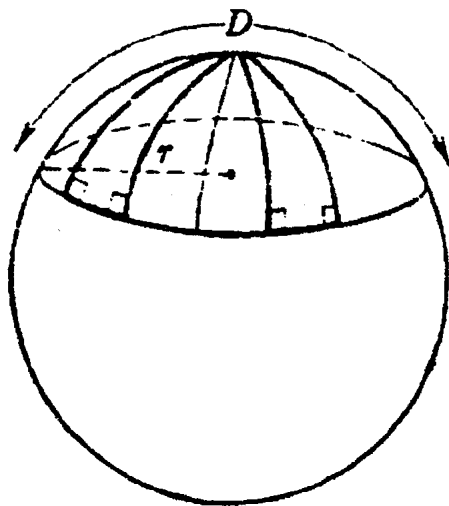


图 20 引力红移

长度收缩公式用到这里，则固定在圆盘上的标准尺，沿半径方向放置的将不在长度方向上发生收缩，因为它们相对惯性系 S 的速度是垂直于尺长方向的；而沿着圆周的切线方向放置的短尺，都要产生长度收缩。于是，用这种缩短了的标准尺来量度圆周之长，其结果应大于 $2\pi r$ ，即

$$\frac{\text{周长}}{\text{直径}} > \pi (3.1416)。$$

复杂的计算还表明，旋转圆盘上的三角形，它的 3 个内角之和小于 180° 。显然，这些几何关系不属于通常的欧几里得几何学。大家知道，球面上的几何也是非欧几里得的（图 21），不过与旋转圆盘上的情况正好相反。



球面上三角形内角之和 $> 180^\circ$

$$\frac{\text{球面上的圆周长 } 2\pi r}{\text{球面上的圆直径 } D} < \pi$$

图 21 球面上的几何（正曲率）

于是，旋转圆盘上的平面是“弯曲”了的平面，它的曲率是负的。由等效原理可进一步推知，有引力场的空间是非欧空间，场强愈大的地方，空间的弯曲也就愈厉害。光在这种空间里所走的“直线”，实际上就是曲线，它类似于球面上的“直线”即是圆弧。根据这一思想，爱因斯坦经过定量的计算后指出，星光掠过太阳表面时会产生可以观测的偏折。为了验证这一预言，1919年英国派出了两个观

测队，他们的任务是在日全食时（只有这时，才能够用肉眼观察太阳边缘后面的星）确定星光是否真的受到太阳引力而偏折，以及有多大的偏折角。果然，观测结果跟广义相对论的理论预料极相近（图 22）。从此以后，爱因斯坦的名声大振，一跃而为全世界的新闻人物。

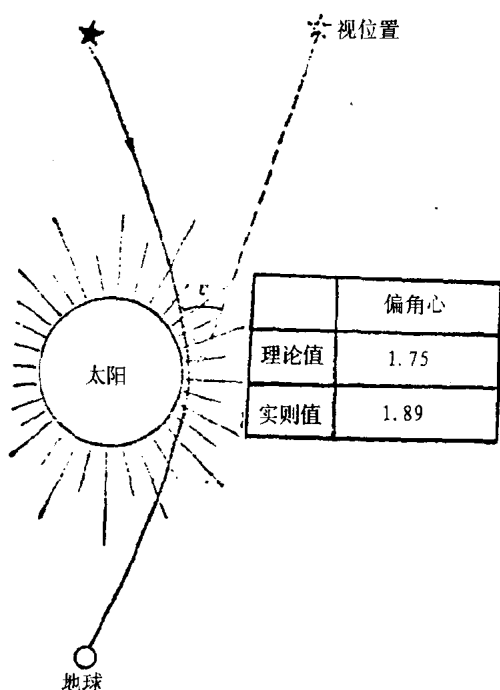


图 22 光线的引力偏折

总之，引力场的存在破坏了时空的均匀性，时间的流

逝不是到处一样的，空间也被弄弯曲了，这一切都取决于场源物质的分布及其运动状态。所以，在广义相对论里，一般地讨论了时空、运动及物质三者之间的联系。

广义相对论的第三个使人赞誉及信服的例子，是精确地描绘了水星绕太阳的进动（图 23）。从天文观测发现，水星绕日运动的椭圆轨道在空间缓慢地改变方面，这种运动叫做水星的进动。对于这个运动，100 多年来牛顿的引力理论总是不能说明得那么圆满（水星轨道每百年的进动角度约为 5600 弧秒，其中不到 1/100 是牛顿理论无法解释的），而爱因斯坦取得了成功，这使他的引力场方程经受住了严峻的考验。

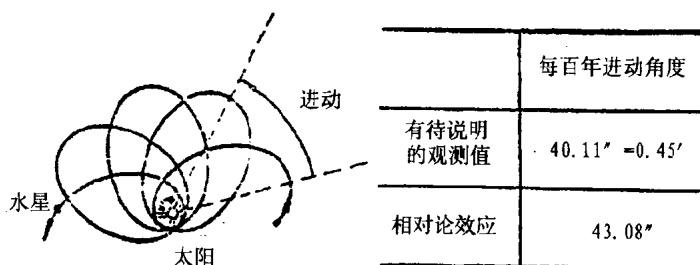


图 23 水星轨道的进动

广义相对论远远超出了牛顿的引力理论，它可以处理极强的引力场及尺度极大的引力空间，它将物理学引向遥远的星系。科学家们结合着观测资料，使用这个理论探讨了宇宙的发展，研究了恒星的归宿。一方面，使人类对宇

宙的奥秘，获得了不少的新奇知识；另一方面，对广义相对论理论的进一步检验，又提供了更多的机会。例如，从1974年起，对一对质量密度很大的双星系统进行了多年的观测，发现它们的转动周期有不断减小的迹象，表明这个系统的引力能量也在不断地减小，而根据爱因斯坦的理论，旋转的双星系统本来就应该以引力波的方式向外辐射能量，将观测的数据与相应的计算对比，它们非常好地相互吻合。人们普遍地认为，这是对广义相对论的又一次验证。

爱因斯坦的追随者——著名的波兰物理学家英菲尔德(L. Infeld, 1898~1968)曾经这样写道：“从对物理学发展的影响来看，狭义相对论是更重要一些，而就人类思想的成就来看，广义相对论却具有更为巨大的意义。”确实，狭义相对论的诞生是顺应了历史发展的潮流，是大势所趋，即使没有爱因斯坦，狭义相对论的出现也不会等很长时间。广义相对论则不是这样，它是爱因斯坦单枪匹马开拓出来的，它走在时代的前头，是最大限度地发挥了思维能力的典范。

黑洞与广义相对论的进一步验证

“黑洞”是当代科学“六大悬案”之一。一些天文学家根据对类星体、河外射电源和某些星系的光谱、光度及射电观测，推测在类星体和这些星系的中心存在着大质量黑洞。例如，10年前 W. 萨金特等人根据对巨椭圆星系 M87

核心区域恒星的光谱和光度观测，推测其中心有一个 5×10^9 个太阳质量的大质量黑洞；J. 科曼德对旋涡星系核心区域的旋转和速度弥散的观测，推算在 NGC3115、4594 和 3377 三个星系的中心可能存在有 $10 \sim 10^9$ 个太阳质量的大黑洞；我们的近邻——仙女星系中心可能有 7×10^7 个太阳质量的黑洞，其伴星系——矮椭圆星系 M32 的中心可能隐藏着 8×10^6 个太阳质量的黑洞等等。此外，银河系中心是否有大质量黑洞也是一个有争议的问题。有人认为来自球状星团的 X 射线可能是从星团中心处质量为太阳 1000 倍左右的黑洞周围的吸积盘发射出来的。人们还根据对天鹅座 X-1、麒麟座 A0620-00 及大麦哲伦星云中 LMCX-3 的 X 射线观测认为它们都是密近双星系统，在此系统中看不见的伴星是黑洞，其质量依次分别为太阳质量的 9~15、7~13 及 7~14 倍。有人认为 SS433 是一个黑洞，超新星 1987A 极有可能坍缩成一个黑洞。F. 乔范庇里等人根据银河系中发射的高能 γ 辐射的总量推测，我们银河系内有 10 万个左右质量为 10 倍太阳质量的黑洞。然而所有这一切都是假设，至今谁也没有直接“看见”黑洞。于是有人怀疑广义相对论所预言的这种神秘天体是否真的存在，还有一些人试图用其他办法来解释所观测到的类星体、星系和其他天体所表现的特征。

众所周知，对广义相对论的三大验证，光线偏折、时间延迟和行星近日点进动都是在较弱引力场（黑洞表面引力场的百分之一）内实现的。关于在超强引力场中，广义

相对论是否适用，至今尚未得到验证。有无可能验证呢？前不久，美国哈佛-施密松天体物理中心的 J. 麦克林托克认为有可能。他指出，既然用现在的仪器能够在两颗中子星的光谱中发现一条 X 射线吸收线，那么用先进 X 射线天体物理设备一定能够测出中子星光谱中更多的 X 射线吸收线。到那时就有可能测定这些吸收线是由哪些元素产生的，以及推知这些元素所存在的包括引力场在内的物理条件。这样，就有可能验证广义相对论是否适用于坍缩的星体遗迹下的强引力场了。但怎样才能更有把握地说真的发现了黑洞呢？麦克林托克认为仍可利用广义相对论所指出的引力场中光和其他辐射的偏折效应。一个典型的黑洞，如果真的存在的话，将被从其周围空间吸积来的物质所形成的吸积盘所围绕着，并被加热到极高的温度。吸积盘发出的 X 射线，越靠近黑洞其强度越大，因此，靠近黑洞处的高能 X 射线在黑洞强引力场的作用下其偏折程度将更大一些。如果 X 射线是偏振的，当我们对吸积盘从外向内测量能量越来越高的 X 射线时，其偏振角有可能平滑地旋转 10° 以上，究竟转多少度与黑洞的质量有关。麦克林托克的这一设想有可能验证广义相对论在黑洞附近的超强引力场中是否适用，宇宙中是否真的存在有黑洞也有待于这一观测结果的披露。

没有黑洞的相对论新观念

伦敦帝国理工学院的 R. 怀特重新考虑将广义相对论应用于引力效应的问题，他的研究从物体互相接近时所需的能量开始。多年来，人们一直认为：较大物体对位于其引力场内的较小物体供给势能。那么，如果两个物体具有完全一样的质量将会发生什么情况呢？怀特认为，“在此情形下，在它们之间使两者互相接近的净能量交换为零。”他断言，一物体提供能量给另一物体的概念不合乎逻辑。他以质量损失的概念替代之。参照核物理中的质能转换原理，他假设在引力作用下运动的物体转变其一小部分质量为运动的能量。基于此推论，例如对于时间膨胀过程，怀特设计了一个方程，该方程与爱因斯坦的方程一致，但加进了质量损失概念。这两个方程从数值上说来非常接近，没有天文观测结果能够验证两者孰优。怀特的进一步计算便触及黑洞是否存在的问题，如果物体在引力作用下损失质量的话，这个能“囚禁”光与物质的超密物体是发展不起来的，这是因为被一个密度极大物体吸引的物质，当其达到被急速吸收阶段时将损失它的全部质量，因此，中心物体累积不起来，而不能构成真正黑洞所需的客观质量。

没有黑洞的宇宙学新观念

目前，大多数天文学家都接受这样的概念：如果一颗中

子星从其伴星吸积了足够的物质,达到了大于 3 倍太阳质量时,则将坍缩为黑洞,但美国里斯大学的 E. 米歇尔前不久却提出了一个新的概念。他认为,恒星内部的超密物质会“燃烧”形成新的一类稳定的粒子, Σ 、 Λ 和 Ξ 等超子,这些超子由“奇异的”夸克为基础组成。在正常条件下,超子是不稳定的,为数极稀少,它们的寿命只不过万亿分之几秒。但在一个坍缩中的中子星内部,这些超子却是很多的,当物质密度达到原子核密度的 10~20 倍时,坍缩星内部的质子、中子和超子将开始互相聚合形成质量越来越大的粒子,如果这些聚合反应释放出足够多能量的话,星体就将爆炸。这种中子星爆发犹如由白矮星爆发形成的 I 型超新星,但能量却大得多。米歇尔提出的这一恒星坍缩的新概念不但回避了至今未被观测的“黑洞”,还有可能解释已被观测到的来自天空四面八方的神秘的 γ 射线暴。米歇尔同时也指出,要验证他提出的新概念,尚需十分有把握地证实坍缩的中子星在将爆炸以前或在行将消失成为黑洞深渊以前确已将自己变成“夸克星”了。

人们之所以认为类星体和活动星系的中心存在着大质量黑洞,主要是为了说明它们所表现出来的种种物理现象。例如从河外双射电源所辐射出来的巨大能量,强对称射电瓣中出现的不对称单喷注,以及射电瓣中出现的“热斑”和热斑在母星系核两侧于相距很远的距离上排列成一条直线等等。美国洛斯·阿拉莫斯国立实验室的 J.C. 格林和 A.L. 裴莱特利用超级计算机模拟两团旋转的 1000 亿太

阳质量星系大小的等离子云相遇的情景，两云各具有沿云团旋转轴方向的偶极子磁场（犹如一根棒形磁铁）。随着时间的推移，他们的云团相互作用模型给出了两云团合成磁场强度的分布曲线，分别和观测到的强河外射电源半人马座 A、NGC131、天鹅座 A 和 NGC253 的等强度发射轮廓线一一对应。模拟结果出现的一些现象，如中心射电源、源两侧相对的热斑、尖角和喷注等等，正是相互作用的磁化了的等离子体云的产物，特别是中心天体只含有带电粒子和磁场，既不存在黑洞也无需假设有黑洞。同步加速辐射的能量来自相互作用云团的转动能量。

由此可见，正如牛顿引力理论兴盛了 200 多年后，在某些领域被爱因斯坦相对论所代替那样，在爱因斯坦引力理论畅行了 70 多年后，对于大质量 X 射线星、类星体和活动星系核也许需用新的引力理论来描述。更重要的是，我们宇宙演化的宇宙模型必需建立在对强引力场正确描述的理论基础之上。这样，我们就不难理解前苏联科学院院士京茨堡所说下列名言的涵义了：“如果宇宙问题是天文学中头号问题的话，那么排在第二位的便要数黑洞问题了。”

责任编辑 曾庆宇
封面设计 钟 嵘

ZHONG XIAO XUE SHENG TIAN WEN ZHI SHI

千里眼与顺风耳——天文观测的方法
太阳大家族——太阳系
无处不在的朋友——时间
太阳的兄弟们——恒星
人类历史的时间表——历法
难解千古之谜——宇宙的一生
茫茫宇宙觅知音——寻找外星人
老树新枝——天文学的起源与发展
星空航海图——天文与航海
星空的联想——神话与传说
太阳系的侏儒——小行星
怎样自制天文望远镜
地球近邻的故事——月球与日月食
生命的源泉——太阳
太阳系里的游荡者——慧星
星空显微镜——天文台与天文馆
星星也有宿舍——星座
人类的家园——地球
不可思议的天体——黑洞
地球的兄弟姐妹们——行星

ISBN 7-5304-1873-4



9 787530 418734 >

ISBN 7-5304-1873-4/Z · 922

定价：120.00元（全套20册）单册定价：6.00元